

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**GRADO EN  
CIENCIAS DEL MAR**

# Análisis de los efectos de los dragados en la circulación estuarina del río Itajaí-Açú, SC

Eva Pavo Fernández

Tutor España: Dra. Amanda Sancho García

Tutor Brasil: Dr. Mauro Michelena Andrade

Curso académico 2019/2020

## **AGRADECIMIENTOS**

Hoy escribo estas líneas para finalizar el Trabajo Fin de Grado, al que tantas horas y esfuerzo he dedicado. El aprendizaje que me llevo es innegable, tanto a nivel académico como personal.

La realización de este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda de las personas a las que agradezco a continuación.

A mis padres, a mi hermano y a mi abuelo, por ser un apoyo a ultranza desde el primer hasta el último minuto del Grado (y de la vida). Gracias por volcar toda vuestra confianza en mí cada día y creer en mí. Soy lo que soy gracias a vosotros. Eternamente agradecida a la vida por haberme dado a vosotros como familia. Os quiero muchísimo.

A Kike, por darme su mano y acompañarme en este camino. Por arrojar luz cuando no conseguía ver nada claro. Por ayudarme a crecer como persona. Agradecerte las horas dedicadas a leer y revisar el TFG. Por hacerme parar, reponer fuerzas y coger impulso. Por quererme como lo haces. Por no dejar de creer en mí y enseñarme a que yo también lo haga. Te vuic molt.

A Marta, fiel compañera de vida, pese a la distancia. Gracias por ser siempre apoyo incondicional, por alegrarte de mis éxitos y estar a mi lado en las derrotas. Gracias por absolutamente todo. Juntas en las batallas, hoy y siempre.

A Ángela, lo mejor que me llevo de la carrera. Siempre con una palabra amable para decir y un gesto de apoyo para mostrar. Gracias por los stickers y las fotos de Gru y Zaydita mientras trabajaba, se hizo mucho más llevadero. Gracias por mostrar interés en mi trabajo y leértelo. Agradecerte todos y cada uno de los momentos que hemos vivido fuera de la universidad, tú y yo, juntas de principio a fin.

A Sonia, por compartir esta experiencia juntas, por los lugares que hemos conocido, las canciones que hemos cantado y las recetas que hemos cocinado. Por todo lo que hemos aprendido. Por el apoyo que me has brindado. Obrigada, amiga.

A M<sup>a</sup> José y Enrique, por quererme como si fuera parte de la familia y cuidarme tan bien. Gracias por llamarme y hacerme reír todos esos ratos. Por preocuparos por mí y tenerme presente. Gracias de corazón.

A mis tutores, Amanda y Mauro, por las sugerencias de mejora, las revisiones y la infinita ayuda prestada. Por animarme a seguir y conseguir mis objetivos. Gracias por

guiarme y haberme facilitado los medios para la realización de este trabajo. Gracias por todas las horas dedicadas a resolver mis dudas.

Al Laboratorio de Oceanografía Física (LOF) de UNIVALI por cederme los datos. También todas las personas que forman parte de él, por ayudarme en lo que necesitara siempre, en todo momento, desde que llegué hasta que me fui.

A todas las personas mencionadas anteriormente, y a todo aquellos que han formado parte de este camino, GRACIAS.

## **ÍNDICE**

LISTA DE TABLAS .....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	v
Resumen .....	1
Abstract .....	1
1. Introducción .....	3
2. Objetivos .....	12
3. Material y métodos .....	13
3.1. Descarga fluvial .....	13
3.2. Corrientes .....	14
3.2.1. Comportamiento bajo descarga fluvial similar .....	15
3.2.2. Comportamiento bajo misma fase lunar .....	15
3.3. Análisis armónico .....	16
4. Resultados y discusión .....	18
4.1. Descarga Fluvial .....	18
4.2. Corrientes .....	23
4.2.1. Comportamiento bajo descarga fluvial similar .....	23
4.2.2. Comportamiento bajo misma fase lunar .....	27
4.3. Análisis armónico .....	36
4.3.1. Análisis en condiciones de descarga fluvial similar .....	36
4.3.2. Análisis en condiciones de alta y baja descarga fluvial .....	39
5. Conclusiones .....	43
6. Líneas futuras de investigación .....	43
7. Referencias .....	45

## **LISTA DE TABLAS**

<b>TABLA 1.</b> FECHAS CORRESPONDIENTES A CADA FASE LUNAR PARA EL PERÍODO DE ANTES Y DESPUÉS DE LOS DRAGADOS. ....	16
<b>TABLA 2.</b> ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE DESCARGA FLUVIAL PARA LOS AÑOS 2008 Y 2011. ....	19
<b>TABLA 3.</b> T-TEST DE DATOS EMPAREJADOS PARA LOS DATOS DE DESCARGA FLUVIAL DE 2008 Y 2011. ....	20
<b>TABLA 4.</b> ANÁLISIS ARMÓNICO DE LOS DATOS DE 2008, SIENDO TIDE LA COMPONENTE DEL ARMÓNICO DE MAREA, <b>FREQ</b> LA FRECUENCIA DE DICHO ARMÓNICO, <b>AMP</b> LA AMPLITUD, <b>AMP_ERR</b> EL ERROR DE AMPLITUD, <b>PHA</b> LA FASE, <b>PHA_ERR</b> EL ERROR DE LA FASE, <b>SNR</b> LA RELACIÓN SEÑAL – RUIDO (SIGNAL-TO-NOISE POWER RATIO). ....	36
<b>TABLA 5.</b> ANÁLISIS ARMÓNICO DE LOS DATOS DE 2011, SIENDO TIDE LA COMPONENTE DEL ARMÓNICO DE MAREA, <b>FREQ</b> LA FRECUENCIA DE DICHO ARMÓNICO, <b>AMP</b> LA AMPLITUD, <b>AMP_ERR</b> EL ERROR DE AMPLITUD, <b>PHA</b> LA FASE, <b>PHA_ERR</b> EL ERROR DE LA FASE, <b>SNR</b> LA RELACIÓN SEÑAL – RUIDO (SIGNAL-TO-NOISE POWER RATIO). ....	37
<b>TABLA 6.</b> ANÁLISIS ARMÓNICO DE LOS DATOS DE 2011 EN CONDICIONES DE BAJA DESCARGA FLUVIAL (160 m <sup>3</sup> /s), SIENDO TIDE LA COMPONENTE DEL ARMÓNICO DE MAREA, <b>FREQ</b> LA FRECUENCIA DE DICHO ARMÓNICO, <b>AMP</b> LA AMPLITUD, <b>AMP_ERR</b> EL ERROR DE AMPLITUD, <b>PHA</b> LA FASE, <b>PHA_ERR</b> EL ERROR DE LA FASE, <b>SNR</b> LA RELACIÓN SEÑAL – RUIDO (SIGNAL-TO-NOISE POWER RATIO). ....	39
<b>TABLA 7.</b> ANÁLISIS ARMÓNICO DE LOS DATOS DE 2011 EN CONDICIONES DE ALTA DESCARGA FLUVIAL (1214,65 m <sup>3</sup> /s), SIENDO TIDE LA COMPONENTE DEL ARMÓNICO DE MAREA, <b>FREQ</b> LA FRECUENCIA DE DICHO ARMÓNICO, <b>AMP</b> LA AMPLITUD, <b>AMP_ERR</b> EL ERROR DE AMPLITUD, <b>PHA</b> LA FASE, <b>PHA_ERR</b> EL ERROR DE LA FASE, <b>SNR</b> LA RELACIÓN SEÑAL – RUIDO (SIGNAL-TO-NOISE POWER RATIO).....	41

## **LISTA DE FIGURAS**

<b>FIGURA 1.</b> LOCALIZACIÓN DE LA DESEMBOLCADA DEL ESTUARIO DEL RÍO ITAJAÍ-AÇÚ. FUENTE: (2009) .....	4
<b>FIGURA 2.</b> SECCIÓN DE SALINIDAD (PSU) DEL ESTUARIO DEL RÍO ITAJAÍ-AÇÚ. FS, REPRESENTAN LOS FLUJOS DE SAL ESTIMADOS, EN $\text{KG}\cdot\text{M}^{-2}\cdot\text{S}^{-1}$ . FUENTE: MODIFICADO DE (2010).....	6
<b>FIGURA 3.</b> SUBDIVISIONES DEL RÍO ITAJAÍ-AÇÚ SEGÚN EL ESQUEMA PROPUESTO POR DIONNE (1963), SIENDO LE EL BAJO ESTUARIO, ME ESTUARIO MEDIO Y UE EL ESTUARIO ALTO. FUENTE: (2002).....	7
<b>FIGURA 4.</b> LOCALIZACIÓN DEL PUERTO DE ITAJAÍ Y LA PLAYA DE CABEÇUDAS. FUENTE: GOOGLE EARTH (2020).....	9
<b>FIGURA 5.</b> (A) BATIMETRÍA DE 2009. EL CANAL DE NAVEGACIÓN INTERNO Y LA CUENCA DE EVOLUCIÓN PRESENTAN PROFUNDIDADES MENORES, MÁXIMAS DE 11 M APROXIMADAMENTE. (B) BATIMETRÍA DE 2014, REPRESENTANDO PROFUNDIDADES MAYORES EN EL CANAL DE NAVEGACIÓN INTERNO Y LA CUENCA DE EVOLUCIÓN, CON MÁXIMAS DE 14 M APROXIMADAMENTE. FUENTE: (2017). .....	11
<b>FIGURA 6.</b> LOCALIZACIÓN DE LA ESTACIÓN LIMNIMÉTRICA EN EL MUNICIPIO DE INDAIAL, SANTA CATARINA, EN LA CUENCA HIDROLÓGICA DEL VALLE DE ITAJAÍ. FUENTE: GOOGLE EARTH (2020). .....	13
<b>FIGURA 7.</b> LOCALIZACIÓN DEL FONDEO DEL ADCP EN EL RÍO ITAJAÍ-AÇÚ. EL MARCADOR ROJO MARCA LA POSICIÓN DEL ADCP EN EL CANAL. EL MARCADOR AMARILLO MARCA LA UBICACIÓN DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN CEPSUL. FUENTE: GOOGLE EARTH (2020).....	15
<b>FIGURA 8.</b> SERIE TEMPORAL DE LA MEDIA MENSUAL DE LA DESCARGA FLUVIAL (LÍNEA SÓLIDA AZUL) Y LA ANOMALÍA (LÍNEA SÓLIDA ROJA) EN 2008. ....	18
<b>FIGURA 9.</b> SERIE TEMPORAL DE LA MEDIA MENSUAL DE LA DESCARGA FLUVIAL (LÍNEA SÓLIDA AZUL) Y LA ANOMALÍA (LÍNEA SÓLIDA ROJA) EN 2011. ....	19
<b>FIGURA 10.</b> SERIES TEMPORALES DE LA DESCARGA FLUVIAL PARA LOS AÑOS 2008 (LÍNEA SÓLIDA AZUL) Y 2011 (LÍNEA SÓLIDA ROJO). LOS RECTÁNGULOS NEGROS MUESTRAN LOS PERÍODOS DE ESTUDIO. LA FLECHA NEGRA INDICA EL INICIO DE LOS DRAGADOS (28/03/2011). ....	22
<b>FIGURA 11.</b> PERFIL DE VELOCIDAD MEDIA DE LAS CORRIENTES EN EL AÑO 2008.....	23
<b>FIGURA 12.</b> EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL NIVEL DE LA SUPERFICIE DEL AGUA EN EL PERÍODO DEL 01/04/2008 AL 05/06/2008. ....	24
<b>FIGURA 13.</b> PERFIL DE VELOCIDAD MEDIA DE LAS CORRIENTES EN EL AÑO 2011.....	25
<b>FIGURA 14.</b> EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL NIVEL DE LA SUPERFICIE DEL AGUA EN EL PERÍODO DEL 01/10/2011 AL 05/12/2011. ....	26

<b>FIGURA 15.</b> COMPARACIÓN DE LAS VELOCIDADES EN LOS AÑOS 2008 (LÍNEA SÓLIDA AZUL) Y 2011 (LÍNEA SÓLIDA ROJA). .....	27
<b>FIGURA 16.</b> PERFIL MEDIO DE LA VELOCIDAD BAJO LUNA LLENA EN LOS MESES DE ABRIL DE 2008 (LÍNEA SÓLIDA AZUL) Y OCTUBRE DE 2011 (LÍNEA SÓLIDA ROJA).....	28
<b>FIGURA 17.</b> PERFIL MEDIO DE LA VELOCIDAD BAJO LUNA NUEVA EN LOS MESES DE ABRIL DE 2008 (LÍNEA SÓLIDA AZUL) Y OCTUBRE DE 2011 (LÍNEA SÓLIDA ROJA). LA VELOCIDAD NULA ESTÁ MARCADA CON UNA LÍNEA NEGRA PUNTEADA. ....	29
<b>FIGURA 18.</b> PERFIL MEDIO DE LA VELOCIDAD BAJO CUARTO MENGUANTE EN LOS MESES DE ABRIL DE 2008 (LÍNEA SÓLIDA AZUL) Y OCTUBRE DE 2011 (LÍNEA SÓLIDA ROJA). .....	30
<b>FIGURA 19.</b> PERFIL MEDIO DE LA VELOCIDAD DE LAS CORRIENTES EN CUARTO CRECIENTE EN ABRIL DE 2008 (LÍNEA SÓLIDA AZUL) Y OCTUBRE DE 2011 (LÍNEA SÓLIDA ROJA). LA LÍNEA PUNTEADA INDICA VELOCIDAD NULA. ....	31
<b>FIGURA 20.</b> PERFIL MEDIO DE LA VELOCIDAD DE LAS CORRIENTES EN CUARTO CRECIENTE EN MAYO DE 2008 (LÍNEA SÓLIDA AZUL) Y NOVIEMBRE DE 2011 (LÍNEA SÓLIDA ROJA). LA LÍNEA PUNTEADA MARCA LA VELOCIDAD NULA. ....	32
<b>FIGURA 21.</b> PERFIL MEDIO DE LA VELOCIDAD DE LAS CORRIENTES EN LUNA LLENA EN MAYO DE 2008 (LÍNEA SÓLIDA AZUL) Y NOVIEMBRE DE 2011 (LÍNEA SÓLIDA ROJA). LA LÍNEA PUNTEADA MARCA LA VELOCIDAD NULA. ....	33
<b>FIGURA 22.</b> PERFIL MEDIO DE LA VELOCIDAD BAJO LUNA NUEVA EN EL PERÍODO DE MAYO DE 2008 (LÍNEA SÓLIDA AZUL) Y OCTUBRE DE 2011 (LÍNEA SÓLIDA ROJA).....	34
<b>FIGURA 23.</b> PERFIL MEDIO DE LA VELOCIDAD EN LOS PERÍODOS DE LOS MESES DE MAYO DE 2008 (LÍNEA SÓLIDA AZUL) Y NOVIEMBRE DE 2011 (LÍNEA SÓLIDA ROJA). LA VELOCIDAD NULA ESTÁ MARCADA CON UNA LÍNEA PUNTEADA. ....	35

## **Resumen**

El río Itajaí-Açú es la mayor fuente de drenaje del estado de Santa Catarina (Brasil). En la desembocadura de este río se encuentra el estuario Itajaí-Açú, que es un estuario altamente estratificado, dominado principalmente por la descarga fluvial. En la desembocadura del río Itajaí-Açú se localiza el puerto de Itajaí, uno de los puertos más importantes del sur del país. Debido a la presencia del puerto, el río Itajaí-Açú y el estuario son constantemente dragados. Por ello, el objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es analizar los efectos de los dragados que tuvieron lugar en 2011 en la circulación estuarina del río Itajaí-Açú respecto a las condiciones de 2008. Así, se analizaron datos de descarga fluvial y velocidad de corriente, registrados mediante un *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) fondeado en el canal del estuario. También se realizó un análisis armónico con los datos registrados por el ADCP para identificar alteraciones en las constituyentes armónicas. Los resultados mostraron un incremento en la velocidad de las corrientes en el estuario tras los dragados de 2011. En los dos períodos (2008 y 2011), la dirección de las corrientes fue de flujo. La clasificación de la marea del estuario se mantuvo, siendo marea mixta, predominantemente semidiurna. Los resultados muestran que los dragados han provocado un cambio en la circulación en estuario al intensificarse las corrientes, que podría ser debida al incremento en las constituyentes armónicas semidiurnas.

Palabras clave: *corrientes, dragado, estuario altamente estratificado, río Itajaí-Açú.*

## **Abstract**

The Itajaí-Açú River is the largest source of drainage in the state of Santa Catarina (Brazil). At the mouth of this river is located the Itajaí-Açu estuary, which is a highly stratified estuary, dominated mainly by river discharge. At the mouth of the Itajaí-Açú River is the port of Itajaí, one of the most important ports in the south of the country. Due to the presence of the port, the Itajaí-Açú river and the estuary are constantly dredged. Therefore, the main objective of this Final Degree Project is to analyze the effects of dredging of 2011 on the estuary circulation of the Itajaí-Açú River. Thus, data on river discharge and current velocity, recorded by an *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) anchored in the channel of the estuary, were analyzed. A harmonic analysis was also performed with the data recorded by the ADCP to identify alterations in the harmonic constituents. The results showed an increase in current velocity in the estuary after the 2011 dredging. In both periods (2008 and 2011), currents were ebb-directed. Even so, the tidal classification of the estuary was maintained, being a mixed tide, predominantly semidiurnal. The results suggest that the dredging has modified the



estuarine circulation as the currents intensified due to the increase in the amplitude of the semidiurnal harmonic constituents.

Keywords: *currents, dredging, highly stratified estuary, Itajaí-Açú river.*

## **1. Introducción**

Un estuario se define, según Cameron and Pritchard (1963), como un cuerpo de agua costero semicerrado que tiene una conexión libre con el mar y en el cual el agua de mar es considerablemente diluida por el agua dulce proveniente del drenaje continental.

Estos ambientes son importantes porque desempeñan diversas funciones, desde biológicas hasta económicas. Desde el punto de vista biológico, muchas especies de peces, aves y mamíferos utilizan los estuarios para desarrollar sus hábitos de vida, pues dependen de los estuarios para vivir, obtener alimento y reproducirse. Por ello que los estuarios han recibido el sobrenombre de “cunas marinas”. También sirven de descanso y abastecimiento para las aves migratorias. Muchas de las especies de peces de alto valor comercial se desarrollan en los estuarios. Además, son áreas de alta productividad biológica por la gran cantidad de nutrientes que llegan del continente. Estos nutrientes favorecen la presencia de organismos fitoplanctónicos que, a su vez, ven aumentada su actividad fotosintética por la mayor penetración de la luz solar, debido a la poca profundidad que presenta el estuario (EPA, 2018).

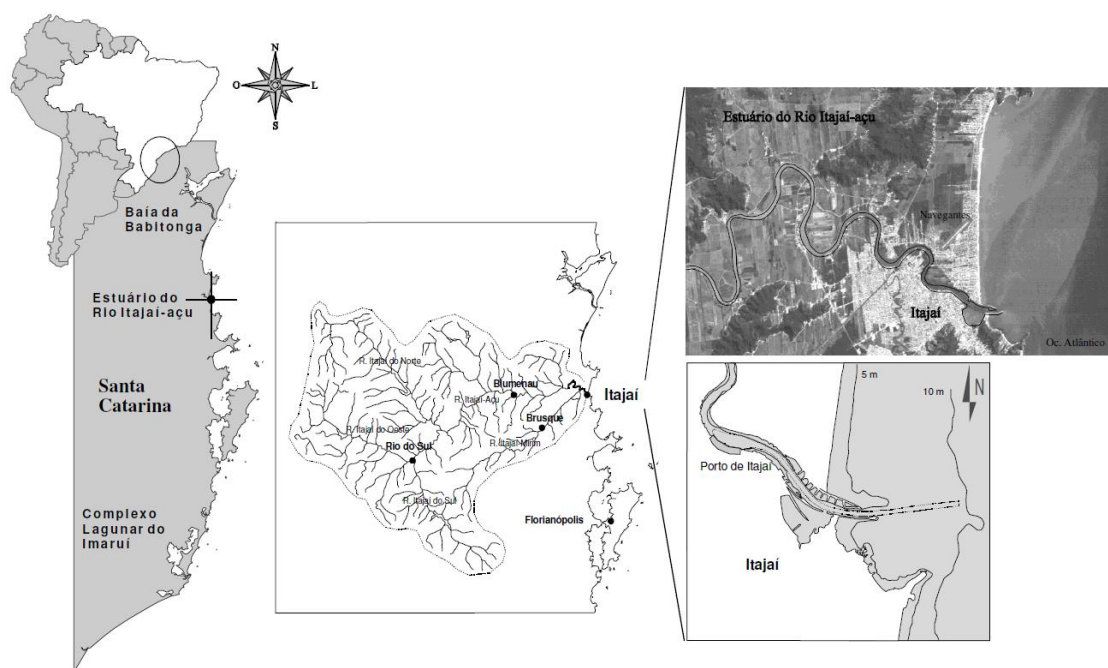
Los estuarios son importantes a nivel económico para las comunidades costeras, sirviendo de puntos focales para el comercio local, pues son lugares adecuados para la instalación de puertos, lo que facilita el transporte de mercancías (Unión Europea, 2012)

El estudio de los estuarios es importante ya que, por un lado, ofrece un laboratorio natural donde se pueden interpretar los procesos físicos ocurrientes, y, por otro lado, casi el 60% de las ciudades más pobladas del mundo están situadas cerca o al lado de estuarios (Miranda, 2017).

El estado de Santa Catarina es el 11º estado más poblado de Brasil, siendo Itajaí la séptima ciudad más poblada del estado, según el censo realizado en 2019 por el Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE). En esta ciudad se encuentra el río Itajaí-Açú, que constituye la mayor fuente de drenaje del estado de Santa Catarina, drenando un área de, aproximadamente, 15500 km<sup>2</sup> con una forma triangular (Schettini *et al.*, 2006), representando cerca del 16% del área estatal (Pereira-Filho *et al.*, 2010). Su cuenca hidrográfica está marcada por la presencia de algunas de las principales ciudades del estado, como Blumenau, Brusque e Itajaí. El drenaje se concentra en cuatro afluentes principales con, aproximadamente, el mismo tamaño de sus cuencas. Esto resulta en aumentos puntuales del volumen de agua después de las lluvias,

consecuencia del comportamiento a corto plazo de la descarga fluvial (Schettini *et al.*, 2006).

En la desembocadura del río Itajaí-Açú se encuentra el estuario Itajaí-Açú, que es un estuario altamente estratificado (Schettini *et al.*, 2013). El estuario del río Itajaí-Açú (Figura 1) está localizado en el litoral centro-norte de Santa Catarina, aproximadamente 80 km al norte de Florianópolis, entre las ciudades de Itajaí y Navegantes. Sus aguas fluyen hacia el océano Atlántico en 26° 54.7' S y 48° 38,1' O. El estuario es estrecho (~ 200 m), largo (~ 70 km) (Schettini, 2008) y profundo (~ 14 m).



**Figura 1.** Localización de la desembocadura del estuario del río Itajaí-Açu. Fuente: Schettini e Truccolo (2009).

El estuario está localizado en una planicie costera, presentando morfología similar a un río meandrante con una profundidad media de 200 metros (Schettini y Truccolo, 2006). La largura del bajo estuario es de 7 km desde mar abierto hacia tierra adentro.

Según la clasificación de Fairbridge (1980), el estuario se clasifica como un estuario de frente deltaica. Los estuarios de frente deltaica son sistemas dominados por ríos, siendo, normalmente, estrechos y sujetos a regímenes micro o mesomareales. La descarga fluvial vence a los efectos mareales, limitando la intrusión o incluso inhibiendo la presencia de agua marina (Schettini *et al.*, 2006).

El río Itajaí-Açú es responsable del 90% del aporte fluvial del estuario del río Itajaí-Açú siendo el 10% restante del volumen de agua recibido proveniente del río Itajaí-Mirim

(Schettini, 2002). El régimen hidrológico, determinado principalmente por el aporte fluvial del río Itajaí-Açú es muy variable a lo largo del tiempo, tanto estacional como interanualmente (Pereira Filho *et al.*, 2003).

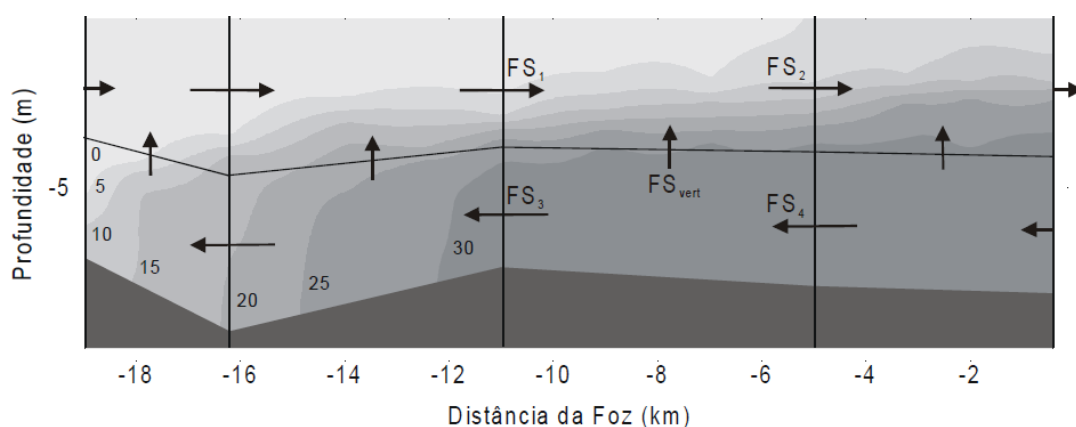
El principal agente determinante de los procesos estuarinos en el estuario del río Itajaí-Açú es la descarga fluvial, de modo que las variaciones del nivel del agua debido a las mareas tienen un papel secundario. La descarga fluvial puede explicar aproximadamente el 70% de la variabilidad de la posición de la cuña salina que aparece en algunas épocas del año en el estuario (Zaleski e Schettini, 2010). Tan solo un 30% de la variabilidad es debida a la marea o a fenómenos meteorológicos. La descarga fluvial y los gradientes longitudinales de salinidad generados por dilución del agua de mar son fundamentales para la dinámica del estuario y, en consecuencia, para los procesos de transporte y mezcla que ocurren en su interior (Antunes, 2010).

La descarga del río Itajaí-Açú es relativamente baja durante la mayor parte del tiempo y se pueden observar pulsos esporádicos de alta descarga ( $5390 \text{ m}^3/\text{s}$ ) en función de las lluvias en la cuenca hidrológica (Schettini, 2001). La descarga fluvial media anual es de  $228 - 282 \text{ m}^3/\text{s}$  (Schettini and Toldo, 2006), variando de 17 a  $5390 \text{ m}^3/\text{s}$  (Antunes, 2010). La descarga fluvial mensual media presenta dos picos, uno en febrero y otro en octubre.

Debido a la variabilidad climática interanual, se pueden distinguir años secos y húmedos. Valores bajos de descarga fluvial, por ejemplo, por debajo de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ , predominan la mayor parte del tiempo durante años secos, con pulsos esporádicos de más de  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ , causados por tormentas convectivas en verano y frentes fríos en invierno. Los períodos con valores bajos de descarga fluvial pueden durar meses, mientras que los pulsos de alta descarga fluvial suelen durar horas o días. Durante los años húmedos, las lluvias siguen el patrón tropical, con verano húmedo e invierno seco. En esos años, la descarga fluvial registra valores por encima de los  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  durante el verano. Durante el resto del año, los valores de descarga fluvial son como los años secos (Schettini e Toldo Jr., 2006).

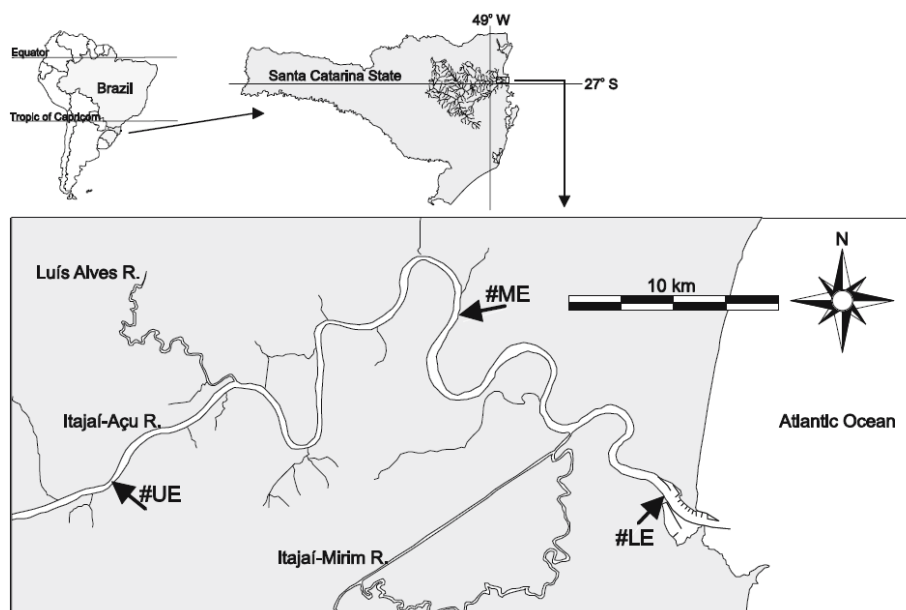
El clima de la región, de acuerdo con la clasificación de Köpen, es subtropical húmedo con déficit hídrico y precipitaciones bien distribuidas a lo largo del año. La temperatura media de la región es mayor que  $18^\circ\text{C}$ , con precipitaciones medias anuales y evapotranspiración de 1400 mm y 1080 mm, respectivamente (Pereira-Filho *et al.*, 2010).

Atendiendo a la salinidad, el estuario del río Itajaí-Açú es un estuario altamente estratificado que recorre planicies costeras y vierte agua dulce directamente en la plataforma (Schettini *et al.*, 2013). Esto significa que dominan los procesos advectivos fluviales. El estuario presenta la mayor parte del año una cuña salina (Figura 2) (Zaleski e Schettini, 2010). Esta cuña aparece durante la marea de cuadratura, que es cuando hay menor disipación durante la propagación de la onda de marea, lo que lleva a un mayor flujo de empuje del agua dulce, haciendo notable la separación del agua dulce y salada (Schettini e Truccolo, 2009). Según Schettini (2009), los estuarios altamente estratificados a veces son llamados estuarios de cuña salina cuando el grado de estratificación de la columna de agua es bastante acentuado. Según la clasificación del estuario en el diagrama de Hansen and Rattray (1966), el estuario se clasifica como transicional entre altamente estratificado y cuña salina (Schettini e Truccolo, 2009).



**Figura 2.** Sección de salinidad (psu) del estuario del río Itajaí-Açú.  $FS_i$  representan los flujos de sal estimados, en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Fuente: Modificado de Zaleski e Schettini (2010).

El estuario del río Itajaí-Açú se divide en tres sectores bien definidos (Figura 3). Los primeros 5 km del estuario se definen como el bajo estuario (LE), donde las aguas marinas prevalecen durante prolongados períodos secos. El estuario medio (ME) se define desde el bajo estuario hasta 20 – 25 km desde la boca, clasificado por el límite superior de la intrusión de la cuña salina. El alto estuario (UE) empieza en ese punto hasta el límite de la influencia mareal, aproximadamente 75 km desde la boca. Todos los sectores presentan un comportamiento diferente de flujo y corrientes residuales, ya que la estratificación vertical de la salinidad es más intensa en el medio estuario, y en el alto estuario no hay gradientes baroclínicos (Schettini *et al.*, 2006).



**Figura 3.** Subdivisiones del río Itajaí-Açú según el esquema propuesto por Dionne (1963), siendo LE el bajo estuario, ME estuario medio y UE el estuario alto. Fuente: Schettini (2002).

La influencia marina ocurre por el efecto de las mareas astronómicas y meteorológicas, y frentes de baja presión. La intrusión de sal en la cuenca estuarina es lineal y está inversamente relacionada con la descarga fluvial (Schettini, 2002). Bajo descarga fluvial media, la cuña salina puede alcanzar 18 km río adentro. Para valores de descarga fluvial superiores a 1000 m<sup>3</sup>/s, el agua salada es totalmente expulsada de la cuenca estuarina (Schettini, 2001; Dobereiner, 1985). La descarga fluvial puede explicar el 70% de los desplazamientos, y puede relacionarse empíricamente por la fórmula de intrusión de la cuña salina en (Schettini, 2002).

Los valores de salinidad se encuentran entre 0 y 36 psu, revelando la gran dinámica de entrada y salida de agua dulce y salada (Estaleiro Itajaí, 2018). En el estuario hay dos aberturas, una río arriba donde entra la afluencia unidireccional de agua dulce río abajo, lo que obliga a la renovación de las aguas por el principio de conservación de la masa; y la otra río abajo, la barra, donde hay un intercambio bidireccional en función de las mareas.

La altura media de la marea astronómica regional, clasificada como predominantemente semidiurna, es de 0,8 m, variando de 0,4 a 1,2 m en sición (Pereira Filho *et al.*, 2003). La marea presenta un comportamiento síncrono hasta los 55 km estuario adentro desde la boca, con un desfase de 3,5 horas, aproximadamente.

Las componentes cuatridiurnas ( $M_4$ ,  $MS_4$ ) tienen el mismo peso que las componentes diurnas ( $K_1$ ,  $O_1$ ). Este equilibrio genera una señal de marea compleja durante los períodos de marea muerta, con cuatro mareas altas y mareas bajas por día (Schettini *et al.*, 2006).

La morfología actual del estuario del río Itajaí-Açú sugiere que el sistema se encuentra en un estado próximo al de equilibrio hidráulico (Fiedrichs, 1995) entre la erosión y sedimentación, mantenido por la acción opuesta de la entrada de agua durante los periodos dominados por la marea (*Marine Mode*), y erosión y transporte durante los episodios de gran descarga fluvial (*Fluvial Mode*) (Schettini e Toldo Jr., 2006).

La temperatura del agua en la región del bajo estuario varía entre 15°C y 30°C. Las mayores temperaturas fueron observadas en los meses de diciembre, febrero y marzo. Las temperaturas más bajas corresponden a los meses de junio, julio y agosto. Todo eso coincidiendo con las estaciones del año.

La influencia del viento no es muy importante. El estuario es sinuoso, por lo que no se pueden formar olas significativamente altas para interferir en la dinámica del estuario (Schettini, 2002).

La hidrodinámica del sistema estuarino es el resultado de la interacción entre procesos fluviales y marinos, y también de los que ocurren en la porción interior del estuario (Truccolo e Schettini, 2009). La circulación en los estuarios se puede modificar debido a actividades antrópicas. Estas modificaciones incluyen cambios directos en la cuenca estuarina, como reclamación de terreno para uso urbano o industrial, ampliación del canal y ensanchamiento por dragados, estabilización de la boca del estuario y elongación por embarcaderos, entre otros. Aumentar la profundidad aumenta la disipación de la energía de marea, derivando en cambios en la mezcla vertical y el transporte de sedimento (Schettini *et al.*, 2017).

El río Itajaí-Açú tiene gran importancia económica por la presencia del puerto de Itajaí. Este puerto es uno de los principales del sur de Brasil, representando el mayor punto de desembarque pesquero nacional (Pereira Filho *et al.*, 2003). El aumento de la actividad portuaria en Itajaí generó la necesidad de establecer un puerto organizado con infraestructura adecuada. Los estudios iniciales para la implantación del puerto consideraron tres lugares, siendo la playa de Cabeçudas (Figura 4), el último meandro del estuario (actual Saco da Fazenda), y donde está actualmente localizado (Schettini, 2008). El Puerto de Itajaí fue considerado puerto organizado en 1966. Se sitúa en un

radio de 500 km de las principales ciudades del estado de Santa Catarina, cercano a las autopistas BR-101 y BR-470. El puerto ocupa un área de 2,78 millones de metros cuadrados (Luz, 2014).



**Figura 4.** Localización del puerto de Itajaí y la playa de Cabeçudas. Fuente: Google Earth (2020)

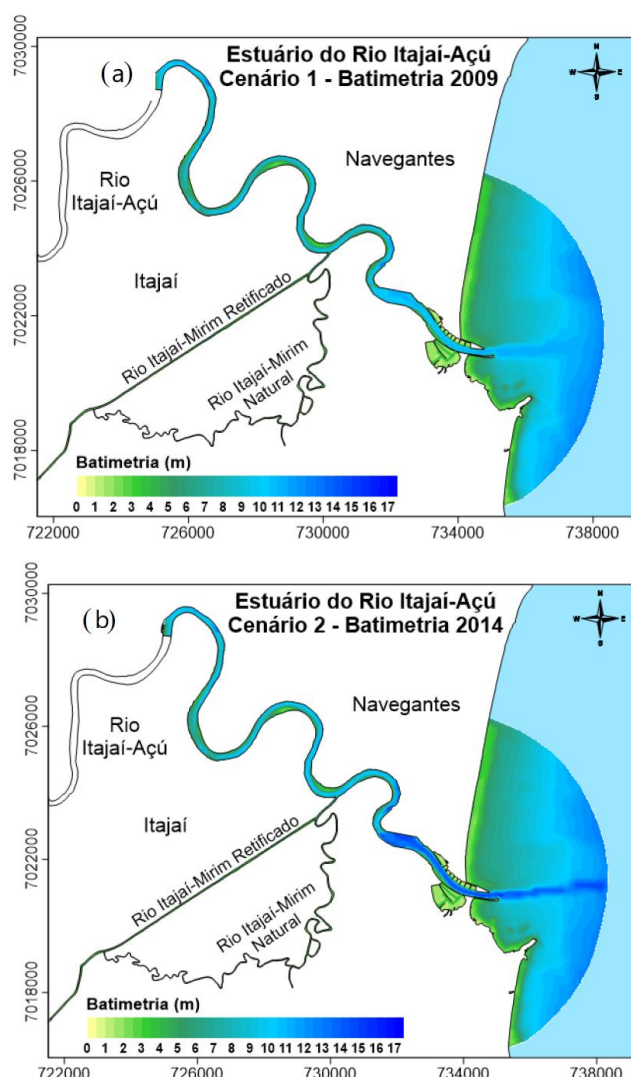
Para que el puerto de Itajaí tenga un calado adecuado, es decir, una profundidad que posibilite el acceso de grandes barcos, es necesario el servicio de dragado en el canal marítimo. De acuerdo con la Agencia Nacional de Transportes Aquaviarios (Antaq), el objetivo de los dragados es eliminar los sedimentos que se encuentran en el fondo del canal marítimo, permitiendo el paso de embarcaciones en el canal de navegación, en los canales de amarre, y su cuenca de evolución.

Por ser un puerto fluvial, necesita de constantes servicios de dragados y mejora de acceso en sus canales de conexión marítimos (Luz, 2014). La condición de los estuarios como puertas naturales, han implicado una importante actividad portuaria asociada a estos ambientes. El uso inadecuado del suelo al largo de la red de drenado que desagua en los canales de navegación portuaria, así como los procesos naturales, provoca que el canal de navegación y el acceso a los puertos cada vez sean más rasos, lo que implica la necesidad de constantes dragados para profundizar y mantener los canales, proporcionando seguridad al tráfico de los barcos. De esta manera, los dragados realizados en estuarios son una herramienta importante en la manutención del desempeño de las actividades portuarias (Antunes, 2010).



En los años 60, el número de dragados aumentó debido al desarrollo del comercio marítimo en el puerto de Itajaí. No obstante, existen registros de dragados desde 1895 (Antunes, 2010). El primer dragado para hacer más profundo el canal fue en 1982, según la Superintendencia del Puerto de Itajaí. La profundidad cambió de 6.5 m a 9.5 m en 1996. En el año 2008 las autoridades portuarias pretendían profundizar aún más el canal de acceso al puerto, que se encontraba con profundidades entre 11 y 12 m, para facilitar el acceso de barcos de mayor porte, pero debido a las lluvias torrenciales ocurridas en noviembre de 2008 en el valle del río Itajaí-Açú, el canal de navegación se hizo más somero, resultando en una necesidad de un dragado de emergencia para profundizar el canal. El dragado comenzó el 24 de diciembre del mismo año y duró hasta julio de 2009 (Antunes, 2010). En marzo de 2011 se iniciaron los trabajos de dragados de 11 para 14 metros. A partir del día 15 de julio de 2013, la Dirección Ejecutiva del puerto de Itajaí estableció las profundidades en los canales de acceso, en la cuenca de evolución y en la cuna del canal. Sin embargo, el servicio de dragado a través de la draga llamada Catarina sigue ejecutándose de acuerdo con el plan de dragado definido según lo dispuesto en (Luz, 2014).

El estuario del río Itajaí-Açú presentaba en 2008 una profundidad media del orden de 7 m (Schettini, 2008), variando entre los 5 y 11 metros en las zonas que no eran dragadas (Schettini *et al.*, 2006). Actualmente la región portuaria es constantemente dragada para la manutención del canal de navegación en la cota de 14 m. El dragado se realiza con el uso de una draga transportadora tipo *Hopper* (Pereira Filho *et al.*, 2003). Debido al desarrollo de las actividades portuarias, la zona del bajo estuario presenta actualmente una profundidad de 14 metros, como se observa en la Figura 5.



**Figura 5.** Comparación de la batimetría en 2009 y 2014 en el estuario del río Itajaí-Açú. (a) Batimetría de 2009. El canal de navegación interno y la cuenca de evolución presentan profundidades menores, máximas de 11 m aproximadamente. (b) Batimetría de 2014, representando profundidades mayores en el canal de navegación interno y la cuenca de evolución, con máximas de 14 m aproximadamente. Fuente: Fachi *et al.* (2017).

Los principales impactos ambientales resultantes de los dragados son el aumento de la turbidez y reducción de la penetración de la luz solar en el agua, alteraciones en la fauna acuática, contaminación del aire y acústica, accidentes de animales marinos con embarcaciones, alteraciones en la hidrología fluvial, interrupción de las actividades de ocio y de otros múltiples usos, desplazamiento de avifauna e ictiofauna, así como, destrucción y pérdida de patrimonio arqueológico (Antunes, 2010). Los dragados repercuten en impactos ambientales con efectos directos sobre hábitats y organismos, o indirectos, atribuidos a alteraciones en la calidad del agua. Los dragados afectan también a la hidrodinámica estuarina (González *et al.*, 2018).

## **2. Objetivos**

Por todo lo anteriormente expuesto, el objetivo general del presente Trabajo Fin de Grado es analizar las variaciones en la circulación en el estuario del río Itajaí-Açú causadas por los dragados realizados en 2011 respecto a la circulación en 2008. Este objetivo general se desglosa en los siguientes objetivos específicos:

- a) Analizar el comportamiento de las velocidades y direcciones de las corrientes en el área de estudio en condiciones de descarga fluvial similar.
- b) Identificar alteraciones en las constituyentes armónicas causadas por la variación en la morfología del canal de acceso en condiciones de descarga fluvial similar.
- c) Comparar los patrones de la circulación de las corrientes en el estuario del río Itajaí-Açú antes y después de los dragados en condiciones de misma fase lunar.
- d) Identificar alteraciones en las constituyentes armónicas causadas por la variación en la morfología del canal de acceso para períodos de alta y baja descarga fluvial en los dos períodos.

### **3. Material y métodos**

#### **3.1. Descarga fluvial**

Para conocer la descarga fluvial, se utilizaron los datos de descarga fluvial medidos por la estación limnimétrica de la Agencia Nacional de Aguas (ANA), localizada en el municipio de Indaial, Santa Catarina (Figura 6). Esta estación monitoriza diariamente el caudal y está ubicada 90 km río a dentro desde la desembocadura, en un lugar alejado de la boca del estuario para eliminar las influencias de las variaciones del nivel de agua causadas por la marea astronómica.



**Figura 6.** Localización de la estación limnimétrica en el municipio de Indaial, Santa Catarina, en la cuenca hidrológica del valle de Itajaí. Fuente: Google Earth (2020).

Dado que la descarga fluvial es la principal fuerza que determina los procesos físicos en el estuario del río Itajaí-Açú (Zaleski e Schettini, 2010), para establecer el período de estudio del comportamiento de las corrientes, tanto el comportamiento típico como el comportamiento bajo misma fase lunar, se hizo una media mensual de los datos de descarga fluvial del año 2008 y del año 2011, antes y después de los dragados, respectivamente.

Para caracterizar las condiciones de descarga fluvial similar se utilizaron los promedios mensuales de ambos años. Así, teniendo en cuenta que la descarga fluvial media es de 228 – 282 m<sup>3</sup>/s (Schettini and Toldo Jr., 2006), se escogieron los períodos del día 1 de abril hasta el 5 de junio de 2008, y del día 1 de octubre al 5 de diciembre de 2011, por tener valores de descarga fluvial próximas a la media. En total, los datos a analizar fueron de 65 días de registro.

Para comprobar si los períodos eran significativamente parecidos, se calcularon las medias y se realizó un t-test para datos relacionados de hipótesis alternativa bilateral con un nivel de confianza del 95% mediante el software R (R Core Team, 2020).

Para caracterizar las condiciones de alta y baja descarga fluvial, se realizó, en primer lugar, un promedio de los datos diarios de descarga fluvial del 2008, por un lado, y del 2011 por otro, para, así, obtener la descarga fluvial anual. Después, se realizó la media mensual de descarga fluvial en 2008 y 2011. Para obtener el valor de la anomalía de descarga fluvial, se restó la media anual a la media mensual. Así, conociendo el valor de la anomalía, se seleccionaron los meses con alta y baja descarga fluvial.

Los datos de las medias de descarga fluvial fueron analizados mediante MATLAB versión R2018b.

### **3.2. Corrientes**

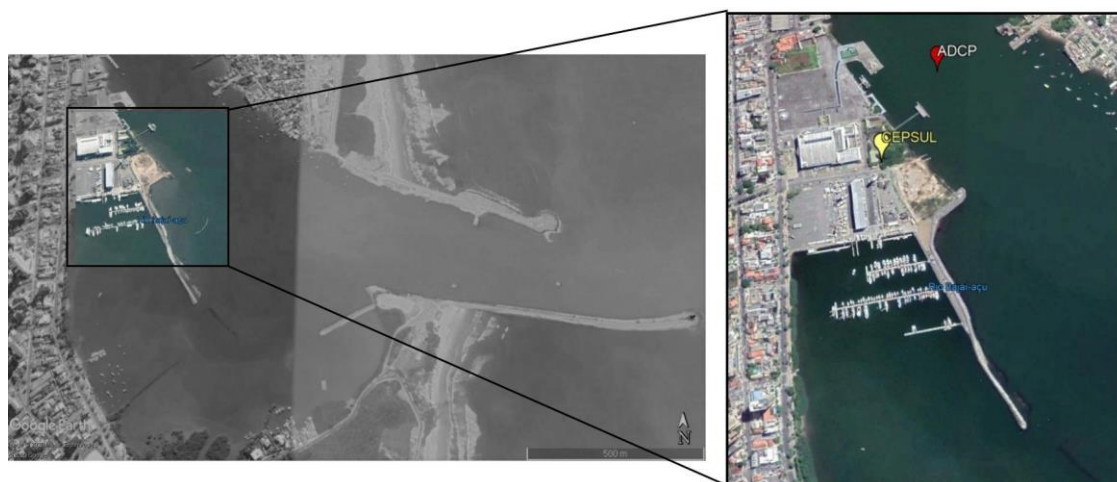
Los datos de corrientes utilizados en este trabajo fueron registrados mediante un ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) de la marca Nortek™, modelo Aquadopp® 1 MHz fondeado mediante una estructura de acero inoxidable fuera del canal principal, cerca del centro de investigaciones CEPsul – IBAMA (Figura 7). Este equipo mide perfiles verticales de la velocidad y dirección de la corriente a través de los tres haces acústicos que posee. Además, mide las oscilaciones del nivel del agua a través de un sensor de presión.

El ADCP estaba programado para coleccionar un perfil cada 10 minutos, dividido en células de 0.5 metros. El número de células estaba configurado para cubrir toda la columna de agua.

Los datos de corrientes que se emplearon para el análisis comprenden los períodos del 1 de abril al 5 de junio de 2008 (para antes de los dragados), y del 1 de octubre al 5 de diciembre de 2011 (para después de los dragados).

Por un lado, se caracterizó el comportamiento de las corrientes en condiciones de descarga fluvial similar y, por otro lado, se caracterizó el comportamiento de las corrientes bajo misma fase lunar y descarga fluvial parecida.

Los datos se analizaron con el software MATLAB R2018b. También se realizó un t-test (análisis estadístico) con R (R Core Team, 2020) para conocer si existían cambios significativos entre los dos períodos.



**Figura 7.** Localización del fondeo del ADCP en el río Itajaí-Açú. El marcador rojo marca la posición del ADCP en el canal. El marcador amarillo marca la ubicación del centro de investigación CEPSUL. Fuente: Google Earth (2020).

### **3.2.1. Comportamiento bajo descarga fluvial similar**

Para comparar el comportamiento de las corrientes bajo descarga fluvial similar, se calcularon los valores de velocidad máxima, mínima y media de las corrientes en los períodos de antes y después de los dragados, mediante el procesado de los datos con el software MATLAB R2018b. A partir de los valores medios de velocidad, se representaron gráficamente los perfiles de velocidad media para los periodos de 65 días seleccionados.

### **3.2.2. Comportamiento bajo misma fase lunar**

Con el fin de estudiar el comportamiento de las corrientes bajo condiciones de misma fase lunar, se analizaron los datos de corrientes registrados por el mismo ADCP para los períodos de abril a junio de 2008 (para antes de los dragados) y de octubre a diciembre de 2011 (para después de los dragados).

Así, se consultó un calendario lunar para escoger los días con misma fase lunar en los dos períodos. En el análisis, se usaron las fechas de las cuatro fases lunares y los siete días siguientes, y se compararon gráficamente. Los fechas de las fases lunares quedan recogidas en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Fechas correspondientes a cada fase lunar para el período de antes y después de los dragados.

FASE LUNAR	PERÍODO ANTES	PERÍODO DESPUÉS
<b>Cuarto creciente</b>	12/04/2008	04/10/2011
	12/05/2008	02/11/2011
		02/12/2011
<b>Cuarto menguante</b>	28/04/2008	20/10/2011
	27/05/2008	18/11/2011
<b>Luna nueva</b>	06/04/2008	26/10/2011
	05/05/2008	25/11/2011
	03/06/2008	
<b>Luna llena</b>	20/04/2008	11/10/2011
	19/05/2011	10/11/2011

### 3.3. Análisis armónico

Con el objetivo de identificar alteraciones en las constituyentes armónicas causadas por la variación en la morfología del canal de acceso, se realizó un análisis de armónicos con el paquete T-Tide de MATLAB (Pawlowicz *et al.*, 2002). Este paquete permite realizar análisis armónicos clásicos con corrección nodal, inferencias, y predicciones usando las constituyentes analizadas (Pawlowicz *et al.*, 2002).

Este análisis se realizó a partir de los datos registrados de nivel de agua por el ADCP fondeado fuera del canal del estuario para el período en condiciones de descarga fluvial similar, y para el período de alta y baja descarga fluvial.

A partir de los resultados de frecuencia obtenidos del análisis con T-Tide (Pawlowicz *et al.*, 2002) y en base al criterio que establecen Thomson and Emery (2014), se escogieron las componentes principales: la componente principal lunar semidiurna,  $M_2$ ; la componente solar-lunar,  $K_1$ ; la componente principal solar semidiurna,  $S_2$ ; y la componente principal lunar diurna,  $O_1$ .

A raíz de los resultados de la amplitud, se calculó el factor de forma (F) para la clasificación del estuario a partir de la ecuación de Defant (1958):  $F = [A(O_1) + A(K_1)]/[A(S_2) + A(M_2)]$ . Este cálculo se realizó para los datos de descarga fluvial similar de 2008 y 2011, y para los datos de alta y baja descarga fluvial.

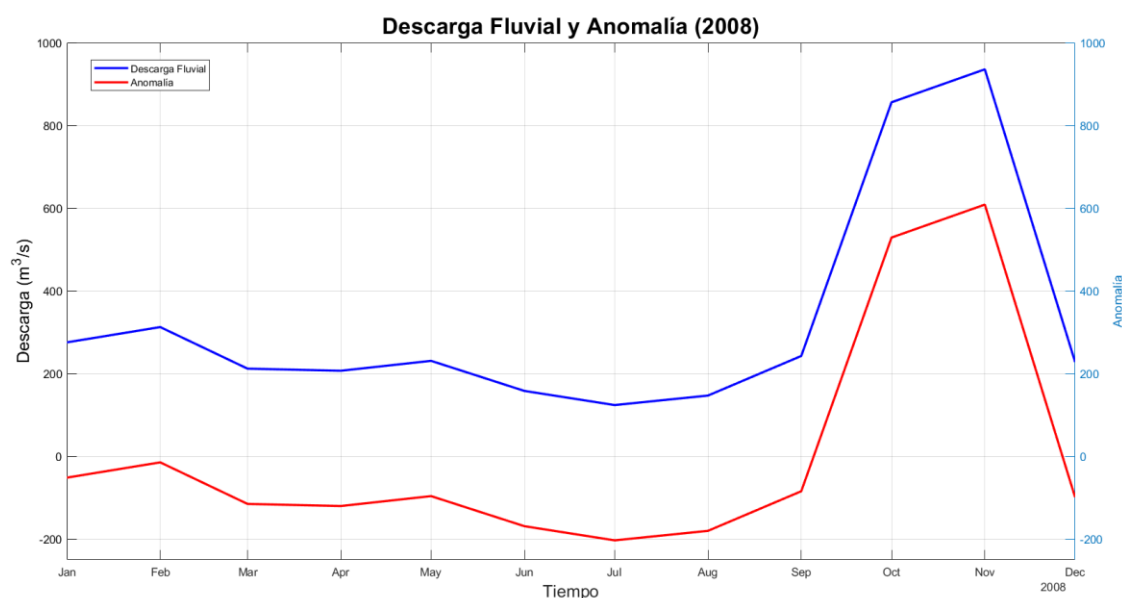


## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Descarga Fluvial

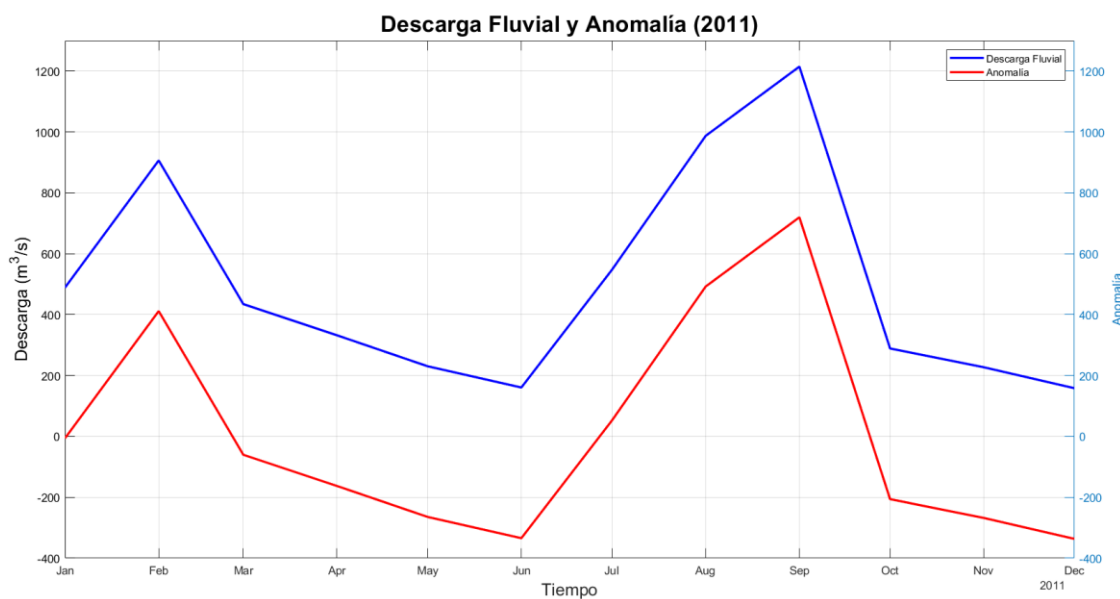
Las medias mensuales y la anomalía de descarga fluvial en 2008 y 2011 se presentan en la Figura 8 y en la Figura 9, respectivamente.

En 2008 se observan valores medios máximos de  $935,56 \text{ m}^3/\text{s}$  alcanzados en el mes de noviembre, y valores mínimos de  $124,08 \text{ m}^3/\text{s}$  alcanzados en el mes de julio. Los valores máximos de anomalía en 2008 son de  $608,61 \text{ m}^3/\text{s}$  en el mes de noviembre, y los valores mínimos de anomalía son de  $-202,88 \text{ m}^3/\text{s}$  en el mes de julio.



**Figura 8.** Serie temporal de la media mensual de la descarga fluvial (línea sólida azul) y la anomalía (línea sólida roja) en 2008.

En 2011 se observan valores medios máximos de  $1214,70 \text{ m}^3/\text{s}$  alcanzados en el mes de septiembre, y valores medios mínimos de  $158,38 \text{ m}^3/\text{s}$  alcanzados en el mes de diciembre. Los valores máximos de anomalía fueron de  $719,76 \text{ m}^3/\text{s}$  en el mes de septiembre, y los valores mínimos de anomalía fueron de  $-336,51 \text{ m}^3/\text{s}$  en el mes de diciembre. Estos resultados ponen en evidencia la variabilidad estacional de la descarga fluvial previamente caracterizada por Pereira Filho *et al.* (2003).



**Figura 9.** Serie temporal de la media mensual de la descarga fluvial (línea sólida azul) y la anomalía (línea sólida roja) en 2011.

En la Tabla 2 se muestran los valores medios de descarga fluvial (mean), la desviación típica ( $\sigma$ ), el error típico de la media (se (mean)). La media de descarga fluvial para el período seleccionado para el análisis en el año 2008 fue de  $213,68 \pm 19.30 \text{ m}^3/\text{s}$ . La descarga fluvial en el período de 2011 fue de  $250,21 \pm 17.03 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Tabla 2.** Análisis estadístico de los datos de descarga fluvial para los años 2008 y 2011.

	$\bar{x}$	$\sigma$	Se(mean)
<b>Descarga 2008</b> <b>(m³/s)</b>	213,6800	157,9685	19,29892
<b>Descarga 2011</b> <b>(m³/s)</b>	250,2123	139,3863	17,02875

Se podría asegurar con un 95% de confianza que la descarga fluvial para ambos períodos fue significativamente parecida, siendo casi el mismo valor de descarga fluvial tanto en el año 2008 como en 2011. El p-valor resultó en un valor de  $\sim 0,18$ , siendo mayor que  $\alpha = 0.05$ , tal como se muestra en la Tabla 3.

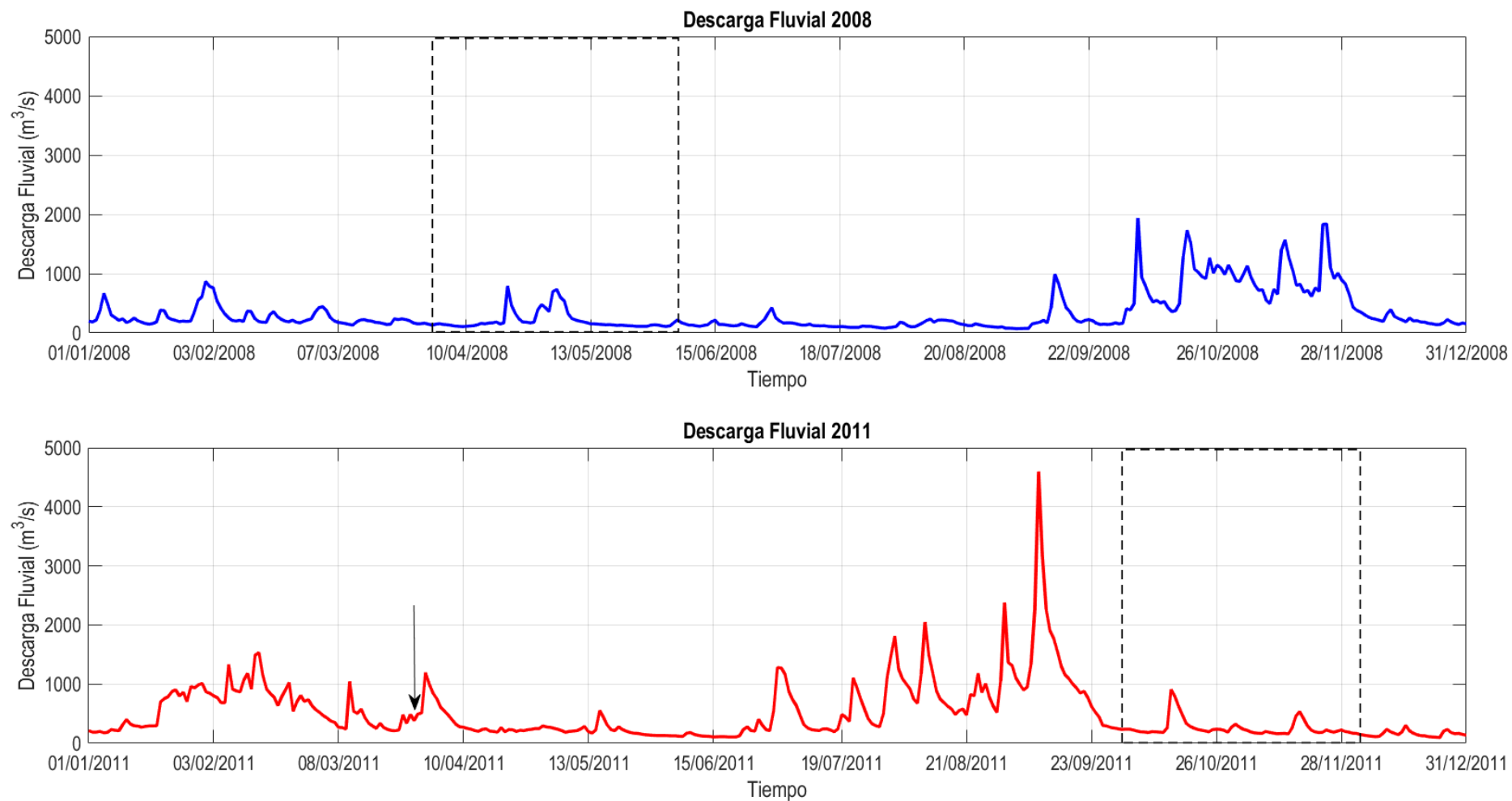
**Tabla 3.** T-test de datos emparejados para los datos de descarga fluvial de 2008 y 2011.

Paired t-test		
Data: Vazao.2008 y Vazao.2011		
<b>t = −1,3569</b>	<b>df = 65</b>	<b>p – value = 0,1795</b>
Alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0		
95 percent confidence interval:		
<b>−90,30242</b>	17,23788	
Sample estimates: Mean of the differences		
<b>−36,53227</b>		

En la Figura 10 se muestra la serie temporal del nivel de descarga fluvial para los años 2008 (línea sólida azul) y 2011 (línea sólida roja). Marcado en negro se presentan los períodos seleccionados para el estudio del comportamiento de la circulación estuarina por presentar valores de descarga fluvial prácticamente iguales ( $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ ). La flecha negra indica el inicio de los dragados (28/03/2011).

Así se puede apreciar que, en el año 2008, los valores máximos de descarga fluvial se encuentran en los últimos meses del año, desde octubre hasta diciembre, con valores en torno a  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ . El valor máximo alcanzado fue de  $1938 \text{ m}^3/\text{s}$ . El resto del año, durante los meses de enero, febrero, abril y mayo, los valores se encuentran por debajo de los  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ . La mayoría de los meses (marzo, junio, julio, agosto y septiembre) se mantienen, incluso, por debajo de los  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ . En cambio, en el año 2011, el pico máximo duplica en valor el máximo de 2008, siendo de  $4597 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cabe destacar que este máximo fue un pulso esporádico, pues el resto del año presenta valores de descarga fluvial mucho menores. En la mayor parte del año, la descarga fluvial no alcanza los  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ . En los meses de enero hasta abril, la descarga fluvial fue mayor, aproximándose a los  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  e incluso superándolos. Desde abril hasta julio, la descarga fue la mitad que en los meses anteriores ( $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ). De ahí en adelante, hasta octubre, incrementó considerablemente, alcanzando valores de  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ . En

octubre los valores disminuyeron para situarse en los 500 m<sup>3</sup>/s, con algunos pulsos de 1000 m<sup>3</sup>/s.



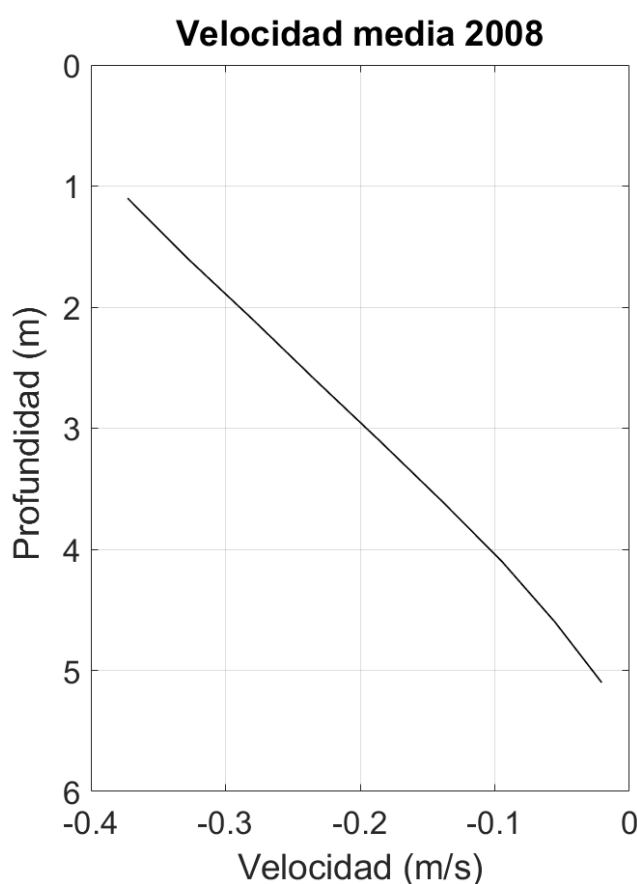
**Figura 10.** Series temporales de la descarga fluvial para los años 2008 (línea sólida azul) y 2011 (línea sólida rojo). Los rectángulos negros muestran los períodos de estudio. La flecha negra indica el inicio de los dragados (28/03/2011).

## 4.2. Corrientes

### 4.2.1. Comportamiento bajo descarga fluvial similar

Los datos de corrientes analizados en el período seleccionado del año 2008 alcanzaron máximos de reflujo de 0,87 m/s y valores máximos de flujo de -0,99 m/s.

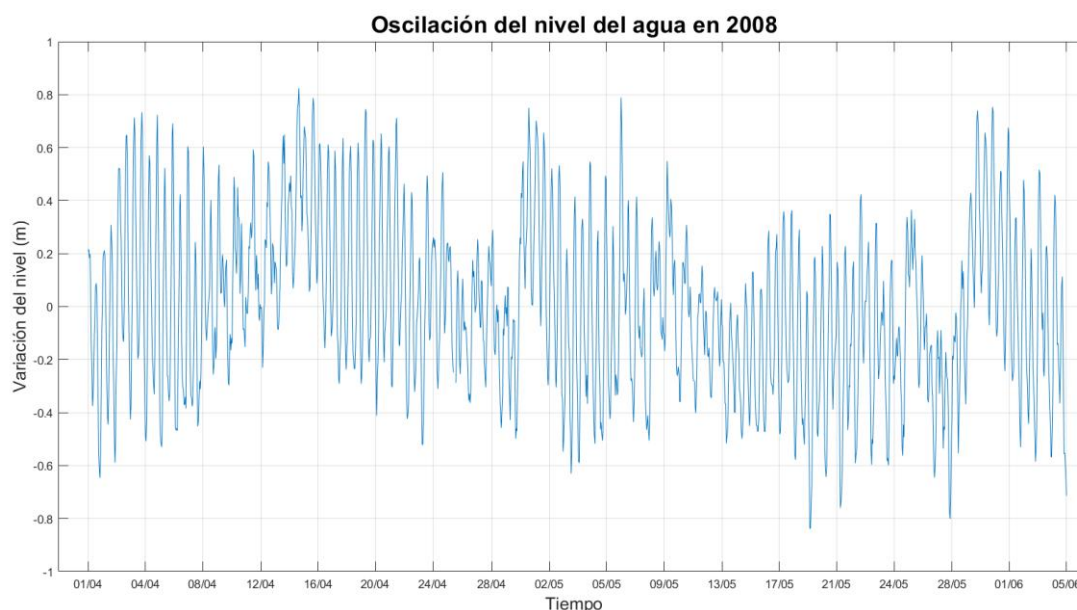
El resultado del perfil medio de la velocidad del 2008 se presenta en la Figura 11. El perfil medio de velocidad muestra que el valor medio de la velocidad de las corrientes fue de -0,20 m/s. La dirección de las corrientes fue predominantemente de flujo (indicado por el signo negativo).



**Figura 11.** Perfil de velocidad media de las corrientes en el año 2008.

Tal y como se observa en la Figura 12, en el período seleccionado del año 2008, la mayor amplitud (mayor nivel del agua) fue el día 15/04/2008 a las 02:06 horas, alcanzando un valor de oscilación de 0,82 m, y la menor amplitud fue alcanzada el día 19/05/2008 a las 07:09 horas, con un valor de oscilación de -0,84 m. Valores positivos de oscilación indican mayor nivel del agua y valores negativos de oscilación indican menor nivel del agua. La diferencia en la amplitud de la oscilación fue de 1,66 m. La diferencia entre los valores del nivel del agua puede deberse a fenómenos de alta frecuencia (marea astronómica) y/o a fenómenos de baja frecuencia (lluvia y viento). A

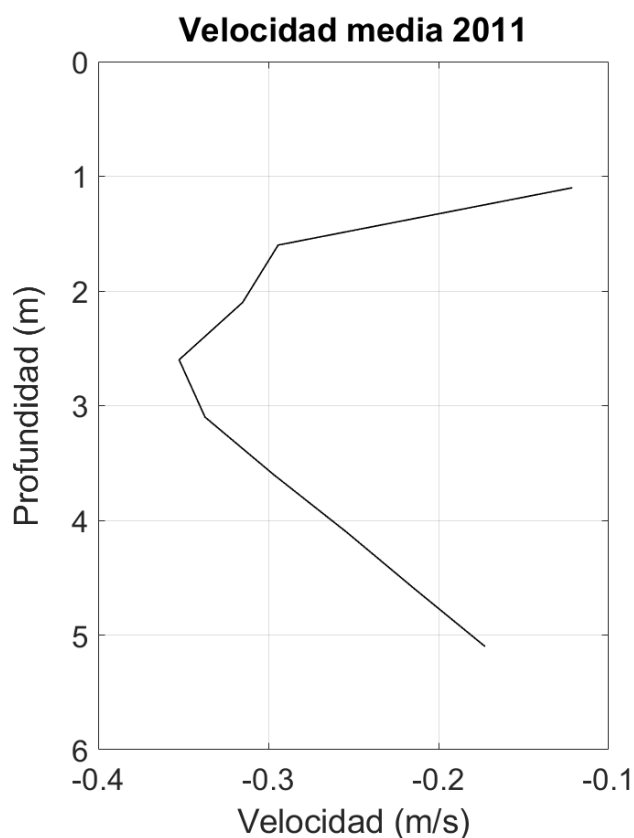
partir de mitad de mayo se observa un descenso en el nivel del agua. Esto puede deberse a una menor descarga fluvial.



**Figura 12.** Evolución temporal del nivel de la superficie del agua en el período del 01/04/2008 al 05/06/2008.

El resultado de los datos de corrientes del año 2011 analizados muestra que la velocidad máxima de refluo fue de 0,48 m/s y valores máximos de flujo de -0,97 m/s. La dirección de las corrientes fue predominantemente de flujo.

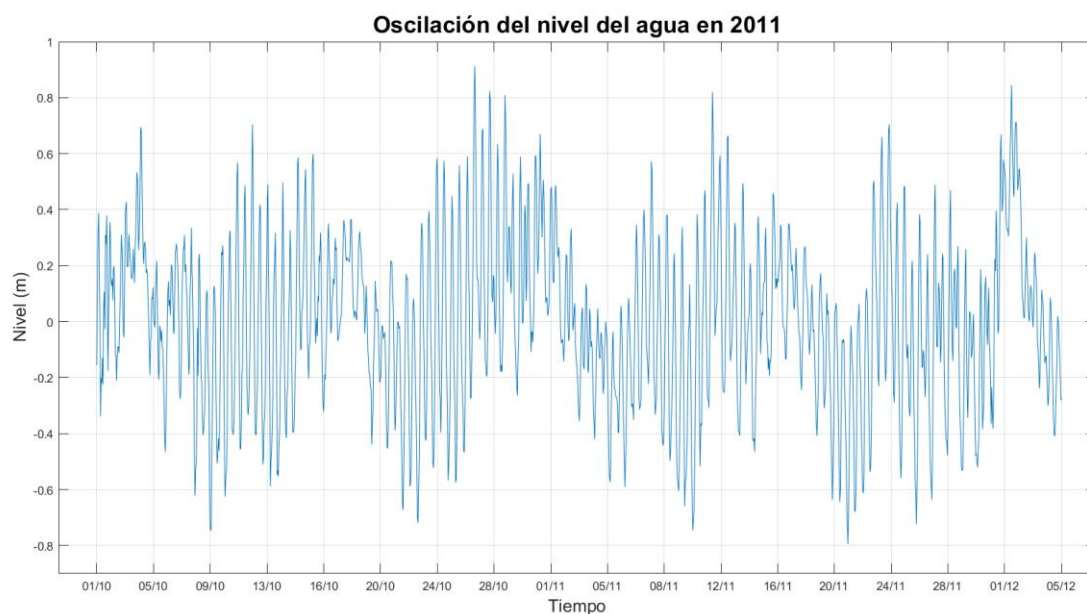
El perfil medio de la velocidad se muestra en la Figura 13, presentando un valor medio de la velocidad de las corrientes de -0,26 m/s. De nuevo, las corrientes residuales fueron de flujo. En este caso, las velocidades en superficie y en el fondo presentan valores similares. A profundidades en torno de los 3,5 metros de la columna de agua se dio un aumento de la velocidad, que, a medida que se acerca al fondo, volvió a decrecer.



**Figura 13.** Perfil de velocidad media de las corrientes en el año 2011.

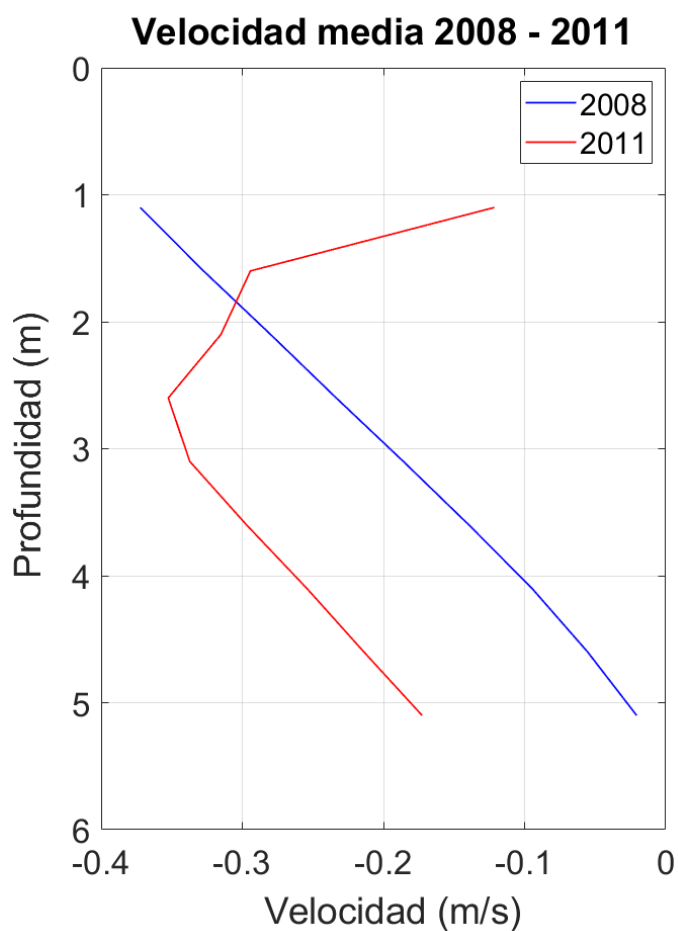
Tal y como se observa en la Figura 14, en el período seleccionado del año 2011, la mayor amplitud de oscilación se alcanzó el día 27/10/2011 a las 02:02 horas con un valor de 0,91 m. La menor amplitud de oscilación fue el día 21/11/2011 a las 06:03 horas, alcanzando un valor de -0,80 m. valores positivos de oscilación indican mayor nivel del agua y valores negativos de oscilación indican menor nivel del agua. La diferencia en la amplitud de oscilación es de 1,70 m, y puede deberse a fenómenos de alta (marea astronómica) y/o baja frecuencia (lluvia y viento).





**Figura 14.** Evolución temporal del nivel de la superficie del agua en el período del 01/10/2011 al 05/12/2011.

En ambos períodos, los valores de velocidad en la superficie fueron más altos que la velocidad en el fondo. Esto indica que en la superficie las corrientes fluyen más rápido en la superficie. Sin embargo, la velocidad de las corrientes en el año 2008 disminuyó con respecto a las corrientes en el año 2011, como puede verse en la Figura 15. Hay una ligera diferencia en las velocidades medias de los dos períodos. Sin embargo, esta diferencia muestra que hubo un cambio en la velocidad de las corrientes, ya que se hizo un promedio durante un largo período de tiempo.



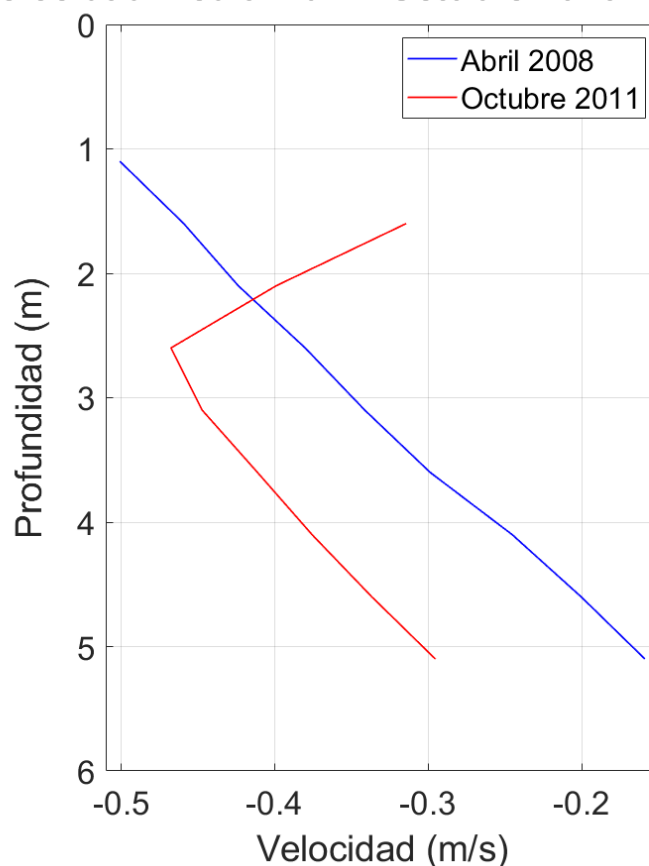
**Figura 15.** Comparación de las velocidades en los años 2008 (línea sólida azul) y 2011 (línea sólida roja).

#### 4.2.2. Comportamiento bajo misma fase lunar

##### Abril 2008 – Octubre 2011

Las corrientes en luna llena en los dos períodos, tanto en 2008 como en 2011, presentaron valores de velocidad media de  $-0,35$  m/s, siendo, por lo tanto, corrientes residuales de flujo. Sin embargo, el perfil medio de la velocidad, presentado en la Figura 16, es considerablemente diferente. Mientras que en abril de 2008 se observa una reducción lineal en la intensidad (velocidad) de la corriente con la profundidad, siendo, así, mayor en la superficie que en el fondo, en 2011 la velocidad en la superficie fue similar a la velocidad en el fondo, siendo estas dos menores (menos intensas) que en el medio de la columna de agua ( $\sim 3,5$  m), donde se alcanzó la velocidad media máxima.

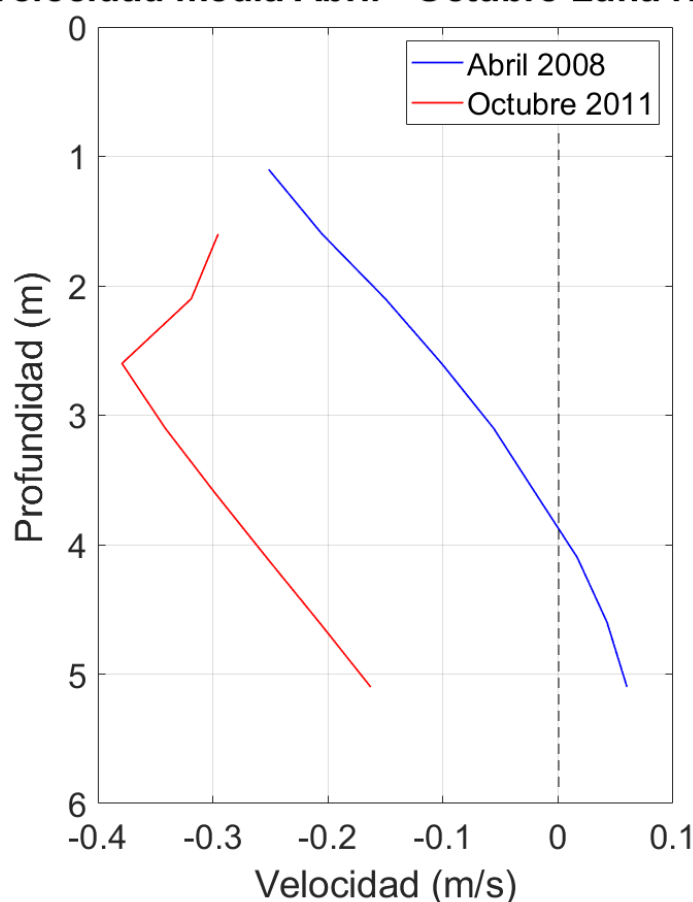
### Velocidad media Abril - Octubre Luna Llena



**Figura 16.** Perfil medio de la velocidad bajo luna llena en los meses de abril de 2008 (línea sólida azul) y octubre de 2011 (línea sólida roja).

Las corrientes en condiciones de luna nueva en abril de 2008 y en octubre de 2011 presentaron una velocidad media de  $-0,10$  m/s y  $-0,27$  m/s, respectivamente, siendo corrientes residuales de flujo en los períodos. En la Figura 17 se presenta el perfil medio de la velocidad para abril de 2008 y octubre de 2011. De nuevo, en el mes de abril la velocidad más intensa fue en la superficie y la menor intensidad fue en el fondo. Cerca de los 2 metros de distancia del ADCP respecto a la superficie la velocidad fue nula. Para octubre de 2011 se puede observar que a los 3,5 metros aproximadamente, la velocidad se intensificó, siendo menos intensa cuanto más cerca del fondo se encontraba. Esto se puede deber a que hubo un pulso de alta descarga fluvial ( $\sim 908$  m<sup>3</sup>/s) el día 10/11/2011, causando la intensificación de las corrientes en ese período. Bajo luna nueva, las corrientes después de los dragados fueron más intensas que antes de los dragados.

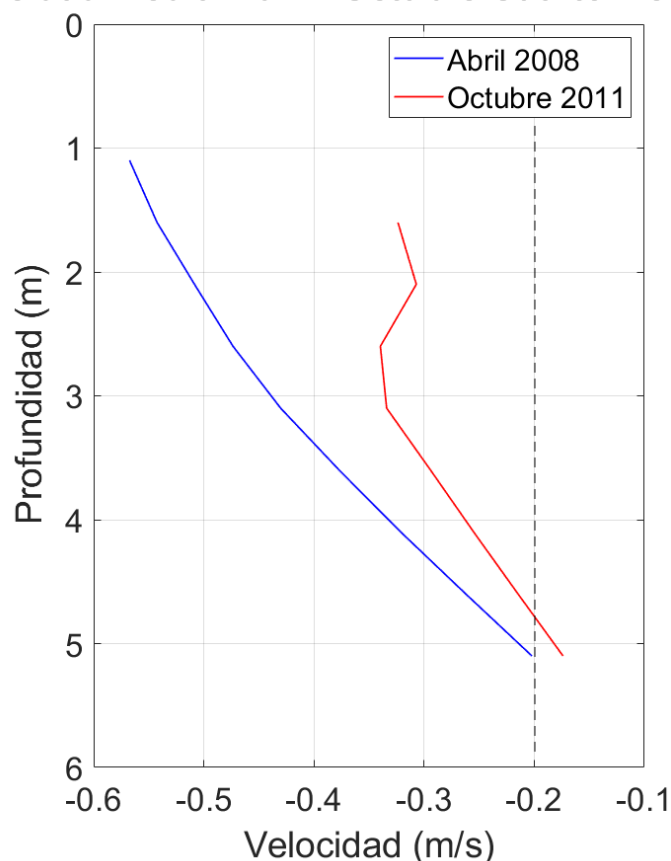
### Velocidad media Abril - Octubre Luna Nueva



**Figura 17.** Perfil medio de la velocidad bajo luna nueva en los meses de abril de 2008 (línea sólida azul) y octubre de 2011 (línea sólida roja). La velocidad nula está marcada con una línea negra punteada.

El perfil medio de la velocidad bajo cuarto menguante en los meses de abril de 2008 y octubre de 2011 se muestra en la Figura 18. De la misma forma que en las otras fases, el perfil medio de la velocidad en abril de 2008 presentó velocidades más intensas en la superficie y menos intensas en el fondo. La velocidad media para el mes de abril de -0,41 m/s. El perfil medio de la velocidad en octubre de 2011 presentó varios cambios de velocidad cerca de la superficie, a pesar de ser mínimos, ya que la velocidad media osciló entre los 0,3 m/s y 0,35 m/s (sentido de flujo). Igual que en el período de antes de los dragados, la velocidad después de los dragados en la superficie fue mayor en términos absolutos que en el fondo. La velocidad media para después de los dragados fue de -0,28 m/s. En los dos períodos, las corrientes fueron de flujo. Las corrientes en abril de 2008 fueron más intensas que después de los dragados.

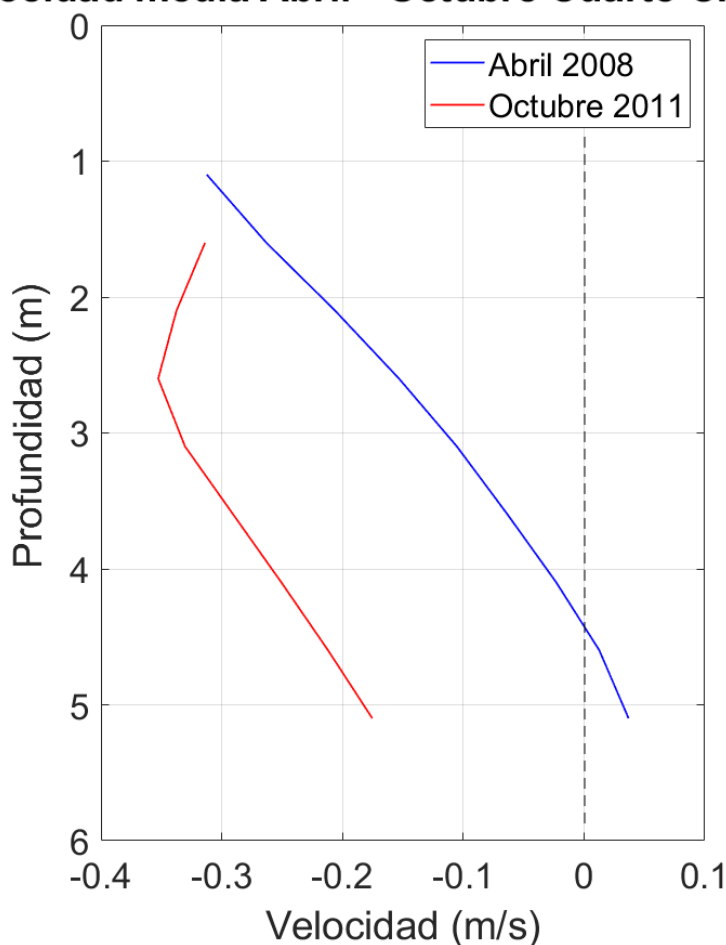
### Velocidad media Abril - Octubre Cuarto Menguante



**Figura 18.** Perfil medio de la velocidad bajo cuarto menguante en los meses de abril de 2008 (línea sólida azul) y octubre de 2011 (línea sólida roja).

Las corrientes en condiciones de cuarto creciente en abril de 2008 y octubre de 2011 presentaron perfiles similares, pero los valores de velocidad media fueron diferentes, como se muestra en la Figura 19. Para el mes de abril de 2008, la velocidad media fue de -0,15 m/s. Por otro lado, las corrientes en el mes de octubre de 2011 presentaron un valor de velocidad media de -0,27 m/s, indicando de nuevo que las corrientes en el año 2011 fueron más intensas que el 2008. Se aprecia que antes de los dragados, la velocidad en la superficie fue mayor, es decir, más intensa que la velocidad alcanzada en el fondo. Igualmente, en luna nueva, la velocidad alcanzó valores de 0 m/s a una profundidad de 1,5 metros, aproximadamente, indicando un equilibrio en la marea. En el fondo se observan valores positivos de velocidad. Eso significa que hubo corrientes de refluo en el fondo en algún momento del registro. En el resto de la columna de agua, las corrientes fueron mayoritariamente de flujo. En el período de después de los dragados, la velocidad en superficie se intensificó ligeramente para después atenuarse en el fondo. En este período, las corrientes residuales fueron de flujo.

### Velocidad media Abril - Octubre Cuarto Creciente

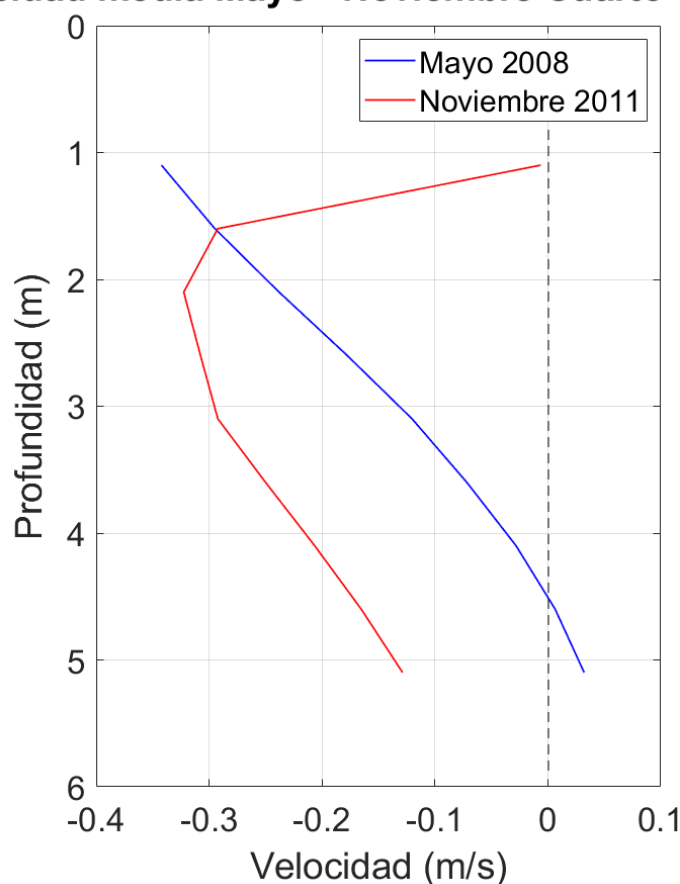


**Figura 19.** Perfil medio de la velocidad de las corrientes en cuarto creciente en abril de 2008 (línea sólida azul) y octubre de 2011 (línea sólida roja). La línea punteada indica velocidad nula.

### Mayo 2008 – Noviembre 2011

Las corrientes en condiciones de cuarto creciente en mayo de 2008 y noviembre de 2011 presentaron perfiles similares, pero los valores de velocidad media fueron diferentes, como se muestra en la Figura 20. Para el mes de mayo de 2008, la velocidad media fue de -0,16 m/s. Por otro lado, las corrientes de noviembre de 2011 presentaron un valor de velocidad promedio de -0,22 m/s. Una vez más, las velocidades más rápidas se registraron en el 2011. En los dos períodos, las velocidades mayores fueron registradas en la superficie y las velocidades menores fueron registradas en el fondo. En mayo de 2008, a los 1,5 metros, la velocidad fue nula, pasando a ser positiva en el fondo. Esto indica que en mayo de 2008 hubo corrientes de refluo por el fondo.

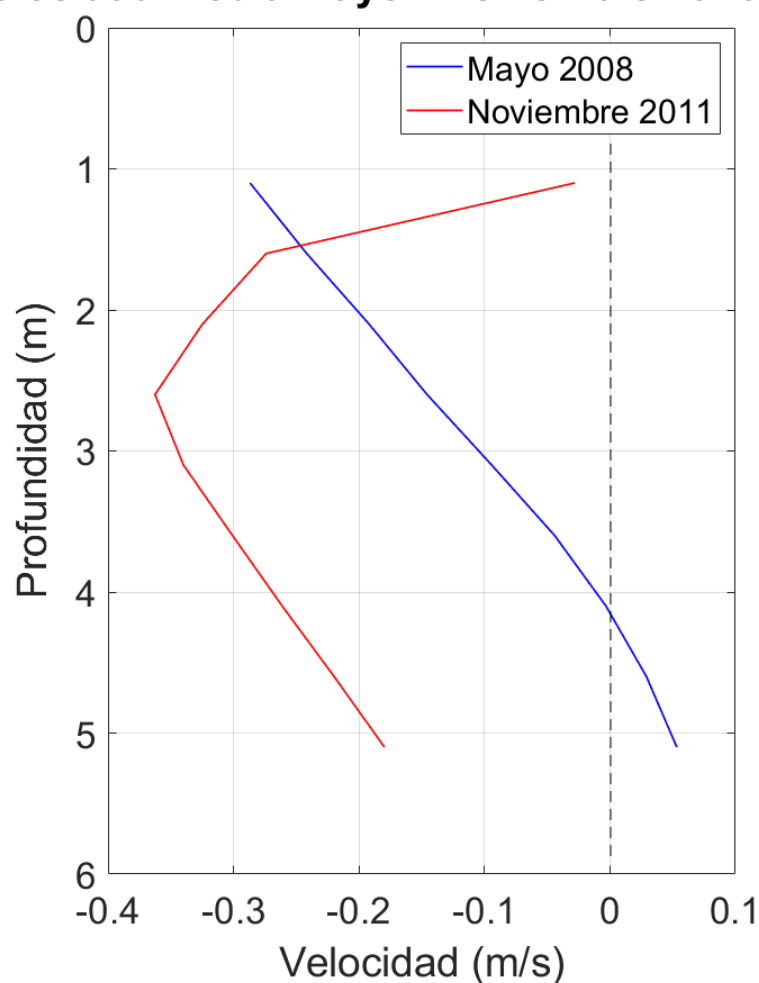
### Velocidad media Mayo - Noviembre Cuarto Creciente



**Figura 20.** Perfil medio de la velocidad de las corrientes en cuarto creciente en mayo de 2008 (línea sólida azul) y noviembre de 2011 (línea sólida roja). La línea punteada marca la velocidad nula.

Las corrientes en condiciones de luna llena en mayo de 2008 y noviembre de 2011 presentaron perfiles similares, pero los valores de velocidad media fueron diferentes, como se muestra en la Figura 21. Para el mes de mayo de 2008, la velocidad media fue de  $-0,12$  m/s. Por otro lado, las corrientes de noviembre de 2011 presentaron un valor de velocidad promedio de  $-0,26$  m/s. Igual que en cuarto creciente, la velocidad en el período de antes de los dragados, en la superficie la velocidad fue más intensa que en el fondo, donde las corrientes residuales fueron de reflujo, ya que se observan valores positivos de la velocidad. En el período de después de los dragados, en la superficie hubo una intensificación de las corrientes debido a un pulso de alta descarga fluvial de  $\sim 535$  m<sup>3</sup>/s ocurrido el día 17/11/2011. Conforme la profundidad aumentó, la velocidad se atenuó. Para el período de después de los dragados, las corrientes residuales fueron de flujo.

### Velocidad media Mayo - Noviembre Luna Llena

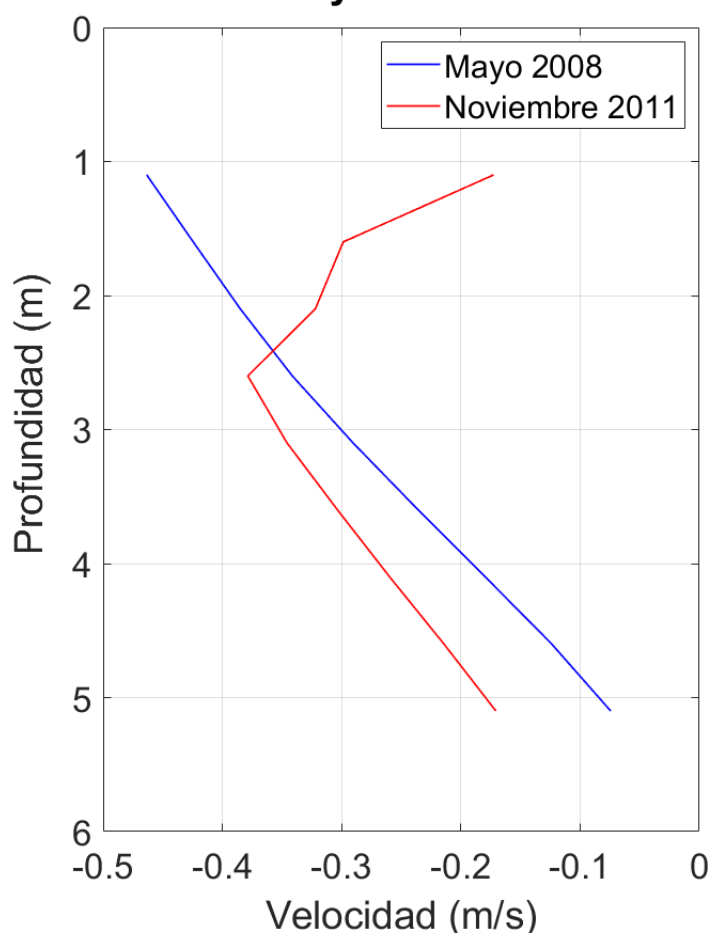


**Figura 21.** Perfil medio de la velocidad de las corrientes en luna llena en mayo de 2008 (línea sólida azul) y noviembre de 2011 (línea sólida roja). La línea punteada marca la velocidad nula.

El perfil medio de la velocidad de las corrientes en luna nueva se muestra en la Figura 22. La velocidad media en el mes de mayo de 2008 fue de -0,29 m/s y la velocidad media en el mes de noviembre de 2011 fue de -0,27 m/s. Se observa que en el período de antes de los dragados las velocidades más intensas fueron en la superficie, mientras que las velocidades menores se encontraban en el fondo. El perfil medio del período de después de los dragados presenta una intensificación en la velocidad de las corrientes en los 3,5 metros, aproximadamente. Desde esa profundidad hasta el fondo, la velocidad de las corrientes fue menos intensa. Las corrientes residuales en los dos períodos fueron de flujo.



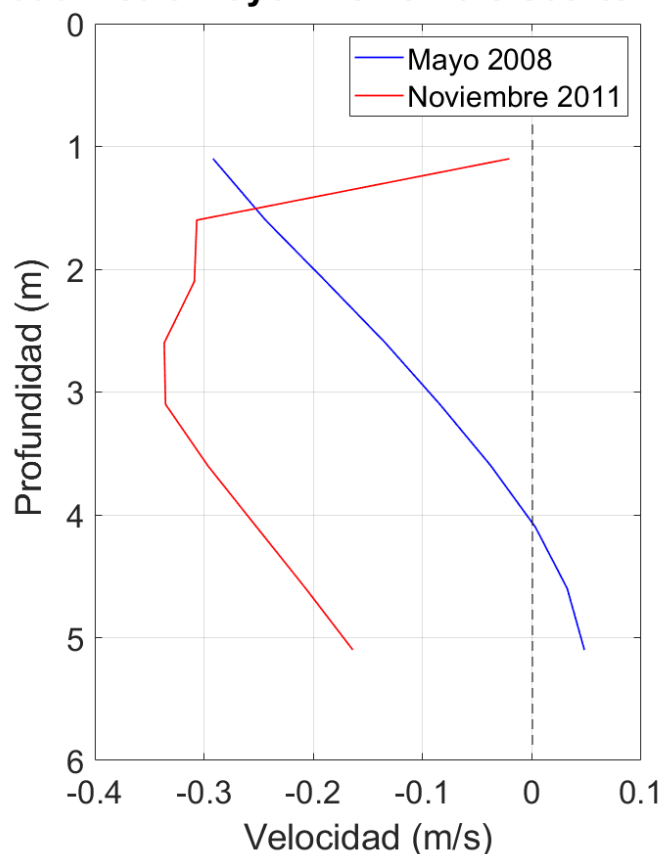
### Velocidad media Mayo - Noviembre Luna Nueva



**Figura 22.** Perfil medio de la velocidad bajo luna nueva en el período de mayo de 2008 (línea sólida azul) y octubre de 2011 (línea sólida roja).

Las corrientes en cuarto menguante en el período de antes y después de los dragados se muestra en la Figura 23. La velocidad media en el período de mayo de 2008 fue de -0,12 m/s y la velocidad media en el período del mes de noviembre de 2011 fue de -0,25 m/s. Se observa que las corrientes después de los dragados fueron más intensas que las de antes de los dragados. El perfil en el período de antes de los dragados muestra una atenuación lineal de la velocidad hasta alcanzar el cero, siendo las corrientes residuales de flujo. A partir de ahí, los valores de velocidad en el fondo se intensificaron, siendo en este caso, corrientes residuales de refluo. El perfil en el período de después de los dragados muestra una intensificación de las corrientes en la capa superficial, manteniéndose hasta la mitad de la columna de agua, para luego atenuarse. En este caso, las corrientes residuales después de los dragados fueron de flujo.

### Velocidad media Mayo - Noviembre Cuarto Menguante



**Figura 23.** Perfil medio de la velocidad en cuarto menguante en los períodos de los meses de mayo de 2008 (línea sólida azul) y noviembre de 2011 (línea sólida roja). La velocidad nula está marcada con una línea punteada.

Las corrientes después de los dragados fueron más intensas que antes de los dragados. Esto se cumple para todos los casos, excepto en el análisis de las corrientes del período de cuarto menguante de abril 2008 y octubre de 2011. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Jeuken and Wang (2009) en el estuario Westerschelde (Holanda), y Van Maren *et al.* (2014) en el estuario del río meandrante Escalda (Holanda) y los de Chant *et al.* (2018) en el estuario de Modaomen bajo condiciones similares. Esta intensificación en la circulación estuarina como resultado de los dragados se puede deber a una reducción de la mezcla vertical o un aumento en el gradiente de salinidad (Chant *et al.*, 2018).

### 4.3. Análisis armónico

#### 4.3.1. Análisis en condiciones de descarga fluvial similar

La tabla de armónicos de la marea de 2008 (Tabla 4) muestra las componentes armónicas de marea. El factor de forma resultó en un valor de 0,61, clasificando el estuario del río Itajaí-Açú como marea mixta, predominantemente semidiurna (Defant, 1958). Este resultado concuerda con los valores obtenidos en un trabajo realizado también antes de las obras de dragados de (Pereira Filho *et al.*, 2003).

**Tabla 4.** Análisis armónico de los datos de 2008, siendo TIDE la componente del armónico de marea, FREQ la frecuencia de dicho armónico (s), AMP la amplitud (m), AMP\_ERR el error de amplitud (m), PHA la fase (°), PHA\_ERR el error de la fase (°), SNR la relación señal – ruido (signal-to-noise power ratio).

TIDE	FREQ	AMP	AMP_ERR	PHA	PHA_ERR	SNR
*MM	0,0015122	0,0611	0,014	89,65	14,42	19
*MSF	0,0028219	0,0535	0,015	228,19	13,84	12
ALP1	0,0343966	0,0076	0,012	47,31	102,76	0,4
2Q1	0,0357064	0,0048	0,011	79,94	133,50	0,19
*Q1	0,0372185	0,0375	0,014	146,61	19,63	7,3
<b>*O1</b>	<b>0,0387307</b>	<b>0,1181</b>	<b>0,014</b>	<b>205,90</b>	<b>6,98</b>	<b>71</b>
NO1	0,0402686	0,0073	0,010	316,15	119,23	0,53
<b>*K1</b>	<b>0,0417807</b>	<b>0,0708</b>	<b>0,013</b>	<b>331,82</b>	<b>10,78</b>	<b>30</b>
J1	0,0432929	0,0057	0,011	199,00	134,54	0,29
OO1	0,0448308	0,0053	0,012	252,75	139,73	0,21
UPS1	0,0463430	0,0029	0,010	251,62	202,57	0,096
EPS2	0,0761773	0,0139	0,014	290,39	67,76	1
*MU2	0,0776895	0,0378	0,014	111,99	21,22	7,3
*N2	0,0789992	0,0391	0,014	83,22	19,57	8,3
<b>*M2</b>	<b>0,0805114</b>	<b>0,1957</b>	<b>0,014</b>	<b>56,07</b>	<b>3,84</b>	<b>2,1e+02</b>
L2	0,0820236	0,0199	0,017	75,19	39,82	1,4
<b>*S2</b>	<b>0,0833333</b>	<b>0,1140</b>	<b>0,012</b>	<b>24,98</b>	<b>7,48</b>	<b>90</b>
ETA2	0,0850736	0,0077	0,013	240,05	98,45	0,34
MO3	0,1192421	0,0051	0,015	96,47	170,70	0,12
M3	0,1207671	0,0238	0,019	314,60	42,77	1,6
*MK3	0,1222921	0,0280	0,018	217,07	40,17	2,5
SK3	0,1251141	0,0241	0,021	8,65	48,03	1,3
MN4	0,1595106	0,0091	0,007	311,13	43,97	1,7

<b>*M4</b>	0,1610228	0,0100	0,006	64,92	38,07	2,4
<b>*SN4</b>	0,1623326	0,0142	0,007	247,89	27,31	4,4
<b>MS4</b>	0,1638447	0,0072	0,007	113,66	51,35	1,2
<b>S4</b>	0,1666667	0,0078	0,006	269,34	50,73	1,7
<b>2MK5</b>	0,2028035	0,0062	0,009	36,80	88,60	0,53
<b>2SK5</b>	0,2084474	0,0046	0,007	14,58	106,13	0,48
<b>2MN6</b>	0,2400221	0,0016	0,013	105,19	223,52	0,015
<b>M6</b>	0,2415342	0,007	0,013	181,28	267,24	0,0032
<b>2MS6</b>	0,2443561	0,0030	0,013	2,05	207,50	0,053
<b>2SM6</b>	0,2471781	0,0015	0,013	63,60	261,59	0,015
<b>3MK7</b>	0,2833149	0,0009	0,005	59,38	232,58	0,027
<b>M8</b>	0,3220456	0,0037	0,006	34,19	112,42	0,35

**Factor de forma (F) = 0,6100**

La tabla de armónicos de marea que se muestra a continuación (Tabla 5) muestra las componentes armónicas para 2011. El factor de forma obtenido fue de 0,37, clasificando ese estuario como marea mixta, principalmente semidiurna (Defant, 1958).

**Tabla 5.** Análisis armónico de los datos de 2011, siendo TIDE la componente del armónico de marea, FREQ la frecuencia de dicho armónico (s), AMP la amplitud (m), AMP\_ERR el error de amplitud (m), PHA la fase (°), PHA\_ERR el error de la fase (°), SNR la relación señal – ruido (signal-to-noise power ratio).

<b>TIDE</b>	<b>FREQ</b>	<b>AMP</b>	<b>AMP_ERR</b>	<b>PHA</b>	<b>PHA_ERR</b>	<b>SNR</b>
<b>MM</b>	0,0015122	0,0373	0,031	313,72	49,8	1,5
<b>*MSF</b>	0,0028219	0,1226	0,03	227,16	14,84	17
<b>ALP1</b>	0,0343966	0,0061	0,019	344,13	187,57	0,11
<b>2Q1</b>	0,0357064	0,0086	0,02	184,16	168,33	0,19
<b>Q1</b>	0,0372185	0,0276	0,026	117,21	65,86	1,1
<b>*O1</b>	<b>0,0387307</b>	<b>0,1027</b>	<b>0,03</b>	<b>51,29</b>	<b>15,18</b>	<b>12</b>
<b>NO1</b>	0,0402686	0,0148	0,024	74,94	105,01	0,39
<b>*K1</b>	<b>0,0417807</b>	<b>0,0547</b>	<b>0,03</b>	<b>325,62</b>	<b>32,4</b>	<b>3,3</b>
<b>J1</b>	0,0432929	0,0021	0,021	355,55	238,41	0,01
<b>OO1</b>	0,0448308	0,0016	0,02	181,69	251,85	0,0068
<b>UPS1</b>	0,046343	0,0016	0,019	185,5	258,39	0,0065
<b>EPS2</b>	0,0761773	0,006	0,021	251,93	201,3	0,082

<b>MU2</b>	0,0776895	0,0299	0,027	177,6	54,54	1,2
<b>*N2</b>	0,0789992	0,0474	0,026	52,47	38,09	3,3
<b>*M2</b>	<b>0,0805114</b>	<b>0,2597</b>	<b>0,03</b>	<b>238,77</b>	<b>6,55</b>	<b>76</b>
<b>L2</b>	0,0820236	0,0085	0,02	152,93	166,13	0,18
<b>*S2</b>	<b>0,0833333</b>	<b>0,1631</b>	<b>0,025</b>	<b>347,23</b>	<b>10,11</b>	<b>41</b>
<b>ETA2</b>	0,0850736	0,0062	0,021	0,89	189,28	0,087
<b>*MO3</b>	0,1192421	0,0333	0,017	165,39	29,22	3,8
<b>*M3</b>	0,1207671	0,0448	0,017	83,55	25,09	6,8
<b>*MK3</b>	0,1222921	0,0275	0,016	71,67	43,66	2,8
<b>SK3</b>	0,1251141	0,0043	0,012	66,68	164,17	0,13
<b>*MN4</b>	0,1595106	0,0329	0,003	137,08	5,75	95
<b>*M4</b>	0,1610228	0,0648	0,003	95,3	3,15	3,70E+02
<b>SN4</b>	0,1623326	0,0029	0,003	72,73	69,19	0,77
<b>*MS4</b>	0,1638447	0,0343	0,003	292,42	6,43	1,10E+02
<b>*S4</b>	0,1666667	0,0095	0,003	53,91	19,6	9,6
<b>*2MK5</b>	0,2028035	0,0079	0,005	129,92	34,38	3,1
<b>2SK5</b>	0,2084474	0,0002	0,003	306,77	236,23	0,0031
<b>2MN6</b>	0,2400221	0,0016	0,002	25,08	78,72	0,77
<b>M6</b>	0,2415342	0,0029	0,002	346,08	40,83	2
<b>*2MS6</b>	0,2443561	0,0068	0,002	171,54	16,23	11
<b>*2SM6</b>	0,2471781	0,0046	0,002	327,26	23,44	4,8
<b>3MK7</b>	0,2833149	0,0026	0,003	30,4	88,57	0,61
<b>M8</b>	0,3220456	0,0024	0,002	171,96	46,05	1,2

**Factor de forma (F) = 0,3722**

El tiempo mínimo de muestreo para que sea factible el análisis con las componentes diurnas y semidiurnas elegidas viene determinado por la componente  $S_2$  (355 horas). Dado que los datos recogidos para el año 2008 registran 1569 horas y en el año 2011 se registraron datos durante 1563 horas, se puede considerar la elección de las componentes como adecuada.

El factor de forma cambió de valor de 0,61 en 2008 a 0,37 en 2011, siendo mayor antes de los dragados que después. Sin embargo, la marea del estuario continuó clasificándose como marea mixta, predominantemente semidiurna.

Los estudios de Jeuken and Wang (2009) y Cai *et al.* (2012) señalan que el aumento de la profundidad de los canales por los dragados produce un aumento en la amplitud de las mareas. Un aumento suficientemente grande en el rango de mareas implica mayores volúmenes de marea, así como una mayor velocidad de las corrientes. Los resultados obtenidos en este trabajo concuerdan en este sentido pues en 2011 las amplitudes de las componentes diurnas de marea disminuyeron ligeramente (2 cm) respecto a las amplitudes del 2008, y las componentes semidiurnas aumentaron (7 cm), aunque la clasificación de la marea del estuario del río Itajaí-Açú se mantuvo. Este aumento en la amplitud de las componentes semidiurnas podría explicar la intensificación de las corrientes en 2011.

#### 4.3.2. Análisis en condiciones de alta y baja descarga fluvial

La siguiente tabla (Tabla 6) muestra las componentes armónicas para 2011 en condiciones de baja descarga fluvial. El factor de forma resultó en un valor de 0,76, clasificando ese estuario como marea mixta, principalmente semidiurna (Defant, 1958).

**Tabla 6.** Análisis armónico de los datos de 2011 en condiciones de baja descarga fluvial (160 m<sup>3</sup>/s), siendo TIDE la componente del armónico de marea, FREQ la frecuencia de dicho armónico (s), AMP la amplitud (m), AMP\_ERR el error de amplitud (m), PHA la fase (°), PHA\_ERR el error de la fase (°), SNR la relación señal – ruido (signal-to-noise power ratio).

TIDE	FREQ	AMP	AMP_ERR	PHA	PHA_ERR	SNR
*SSA	0,000228	0,1502	0,025	166,53	9,32	35
*MM	0,001512	0,0815	0,024	276,73	15,83	12
MSF	0,002822	0,0104	0,018	307,03	122,81	0,33
MF	0,00305	0,0175	0,023	57,28	72,69	0,6
ALP1	0,034397	0,0011	0,02	260,52	243,43	0,0033
2Q1	0,035706	0,0021	0,022	321	233,98	0,0092
Q1	0,037219	0,0027	0,022	267,24	235,02	0,015
<b>O1</b>	<b>0,038731</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,024</b>	<b>339,45</b>	<b>265,6</b>	<b>0,0048</b>
TAU1	0,038959	0,0039	0,023	344,33	224,93	0,029
BET1	0,04004	0,0025	0,021	153,66	246,54	0,013
NO1	0,040269	0,0027	0,022	85,04	224,56	0,015
P1	0,041553	0,0025	0,023	327,13	232,74	0,012
<b>K1</b>	<b>0,041781</b>	<b>0,0026</b>	<b>0,024</b>	<b>96,21</b>	<b>252,28</b>	<b>0,011</b>
PHI1	0,042009	0,002	0,026	172,96	229,48	0,0062
J1	0,043293	0,0022	0,023	93,74	236,47	0,0091
SO1	0,044603	0,0012	0,022	222,02	270,3	0,0028

<b>OO1</b>	0,044831	0,0018	0,021	344,87	295,26	0,0073
<b>UPS1</b>	0,046343	0,003	0,028	272,19	233,24	0,012
<b>EPS2</b>	0,076177	0,0011	0,052	132,15	274,65	0,00048
<b>MU2</b>	0,07769	0,0013	0,05	301,22	265,87	0,00064
<b>N2</b>	0,078999	0,0022	0,053	209,33	255,5	0,0018
<b>M2</b>	<b>0,080511</b>	<b>0,0025</b>	<b>0,06</b>	<b>116,26</b>	<b>271,54</b>	<b>0,0018</b>
<b>MKS2</b>	0,08074	0,0018	0,051	314,97	269,53	0,0013
<b>L2</b>	0,082024	0,0013	0,052	260,26	267,97	0,00059
<b>S2</b>	<b>0,083333</b>	<b>0,0031</b>	<b>0,051</b>	<b>279,62</b>	<b>240,12</b>	<b>0,0035</b>
<b>K2</b>	0,083562	0,0016	0,052	121,2	258,92	0,0009
<b>MSN2</b>	0,084846	0,0015	0,052	352,04	263,08	0,00082
<b>ETA2</b>	0,085074	0,0032	0,052	70,66	257,78	0,0038
<b>MO3</b>	0,119242	0,0001	0,016	198,33	293,2	1,10E-05
<b>M3</b>	0,120767	0,0013	0,018	106,99	256,69	0,0055
<b>SO3</b>	0,122064	0,003	0,018	113,1	231,33	0,027
<b>MK3</b>	0,122292	0,0005	0,02	4,58	264,97	0,00059
<b>SK3</b>	0,125114	0,0011	0,018	215,52	230,46	0,0036
<b>MN4</b>	0,159511	0,0015	0,024	89,68	264,31	0,004
<b>M4</b>	0,161023	0,0036	0,023	302,2	215,54	0,024
<b>SN4</b>	0,162333	0,0007	0,02	70,07	259,5	0,0013
<b>MS4</b>	0,163845	0,001	0,025	264,64	272,06	0,0015
<b>MK4</b>	0,164073	0,0018	0,022	351,37	256,51	0,0067
<b>S4</b>	0,166667	0,0019	0,02	6,16	243,21	0,0086
<b>SK4</b>	0,166895	0,0013	0,021	245,26	260,55	0,0039
<b>2MK5</b>	0,202804	0,0005	0,003	260,89	247,13	0,023
<b>2SK5</b>	0,208447	0,001	0,004	113,53	188,37	0,075
<b>2MN6</b>	0,240022	0,0007	0,002	113,4	148,23	0,12
<b>M6</b>	0,241534	0,0016	0,002	74,95	89,3	0,52
<b>2MS6</b>	0,244356	0,0002	0,002	357,47	232,5	0,016
<b>2MK6</b>	0,244584	0,0021	0,002	308,3	70	0,79
<b>2SM6</b>	0,247178	0,0007	0,002	226,76	154,47	0,13
<b>MSK6</b>	0,247406	0,001	0,002	325,95	113,96	0,28
<b>3MK7</b>	0,283315	0,0006	0,002	10,1	161,76	0,15
<b>M8</b>	0,322046	0,0003	0,001	241,51	216,59	0,053
<b>Factor de forma (F) = 0,76</b>						

La Tabla 7 muestra las componentes armónicas de la marea para 2011 en condiciones de alta descarga fluvial. El factor de forma resultó en un valor de 2,78, clasificando ese estuario como marea mixta, principalmente diurna (Defant, 1958).

**Tabla 7.** Análisis armónico de los datos de 2011 en condiciones de alta descarga fluvial (1214,65 m<sup>3</sup>/s), siendo TIDE la componente del armónico de marea, FREQ la frecuencia de dicho armónico (s), AMP la amplitud (m), AMP\_ERR el error de amplitud (m), PHA la fase (°), PHA\_ERR el error de la fase (°), SNR la relación señal – ruido (signal-to-noise power ratio).

TIDE	FREQ	AMP	AMP_ERR	PHA	PHA_ERR	SNR
SSA	0,000228	0,1258	0,107	282,56	58,25	1,4
MM	0,001512	0,1216	0,116	85,57	57,93	1,1
MSF	0,002822	0,0438	0,096	294,49	150,82	0,21
MF	0,00305	0,0232	0,1	137,42	226,37	0,053
ALP1	0,034397	0,0009	0,009	244,19	236,29	0,011
2Q1	0,035706	0,0022	0,009	170,37	199,68	0,056
Q1	0,037219	0,0006	0,01	193,31	250,18	0,0032
<b>O1</b>	<b>0,038731</b>	<b>0,003</b>	<b>0,01</b>	<b>333,96</b>	<b>187,38</b>	<b>0,095</b>
TAU1	0,038959	0,0016	0,008	212,68	233,2	0,035
BET1	0,04004	0,0021	0,01	338,04	203,9	0,048
NO1	0,040269	0,002	0,009	270,49	251,19	0,048
P1	0,041553	0,0029	0,009	345,44	179,07	0,1
<b>K1</b>	<b>0,041781</b>	<b>0,0034</b>	<b>0,008</b>	<b>84,99</b>	<b>153,8</b>	<b>0,16</b>
PHI1	0,042009	0,0034	0,01	85,06	156,27	0,12
J1	0,043293	0,0018	0,009	217,41	239,29	0,036
SO1	0,044603	0,0019	0,01	175,16	206,48	0,035
OO1	0,044831	0,0008	0,009	39,1	261,37	0,0074
UPS1	0,046343	0,0026	0,01	297,44	194,11	0,066
EPS2	0,076177	0,0006	0,069	158,64	237,92	8,70E-05
MU2	0,07769	0,0022	0,062	68,25	292,63	0,0013
N2	0,078999	0,0002	0,068	255,27	254,47	6,40E-06
<b>M2</b>	<b>0,080511</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,071</b>	<b>199,92</b>	<b>272,7</b>	<b>0,00055</b>
MKS2	0,08074	0,0008	0,068	102,93	256,22	0,00013
L2	0,082024	0,0014	0,065	35,59	266,09	0,00049
<b>S2</b>	<b>0,083333</b>	<b>0,0006</b>	<b>0,063</b>	<b>18,71</b>	<b>259,34</b>	<b>8,50E-05</b>
K2	0,083562	0,002	0,064	235,53	241,41	0,00097
MSN2	0,084846	0,0023	0,067	272,37	239,21	0,0011



<b>ETA2</b>	0,085074	0,0016	0,062	158,89	278,86	0,00063
<b>MO3</b>	0,119242	0,0024	0,007	74,62	194,37	0,12
<b>M3</b>	0,120767	0,0001	0,007	264,25	251,42	9,70E-05
<b>SO3</b>	0,122064	0,0012	0,007	318,8	207,45	0,025
<b>MK3</b>	0,122292	0,0009	0,008	84,32	261,24	0,014
<b>SK3</b>	0,125114	0,0019	0,008	208,62	206,71	0,056
<b>MN4</b>	0,159511	0,0004	0,02	318,1	297,35	0,00041
<b>M4</b>	0,161023	0,001	0,016	42,27	260,4	0,004
<b>SN4</b>	0,162333	0,0022	0,018	346,03	265,91	0,014
<b>MS4</b>	0,163845	0,0011	0,02	129,2	256,9	0,0027
<b>MK4</b>	0,164073	0,0014	0,021	255,59	285,59	0,0045
<b>S4</b>	0,166667	0,0011	0,017	54,94	258,47	0,0037
<b>SK4</b>	0,166895	0,001	0,02	1,03	258,05	0,0028
<b>2MK5</b>	0,202804	0,0015	0,003	199,49	140,59	0,23
<b>2SK5</b>	0,208447	0,0008	0,003	17,92	195,28	0,091
<b>2MN6</b>	0,240022	0,0011	0,002	340,37	147,98	0,27
<b>M6</b>	0,241534	0,0007	0,002	80,94	178,57	0,084
<b>2MS6</b>	0,244356	0,0005	0,002	24,48	220,95	0,039
<b>2MK6</b>	0,244584	0,0014	0,002	150,47	114,28	0,45
<b>2SM6</b>	0,247178	0,0009	0,003	91,57	154,25	0,13
<b>MSK6</b>	0,247406	0,0008	0,002	268,84	153,88	0,11
<b>3MK7</b>	0,283315	0,0004	0,001	206,55	164,06	0,15
<b>M8</b>	0,322046	0,0011	0,001	299,2	101,45	0,54

**Factor de forma (F) = 2,78**

Se observa una diferencia significativa de 2,01 unidades entre el factor de forma (F) en condiciones de baja descarga fluvial y alta descarga fluvial. En este caso se observa que las amplitudes de todas las constituyentes principales aumentan con la descarga fluvial, excepto la amplitud de  $M_2$ , que disminuye. Matte *et al.* (2018), tras el estudio realizado en el estuario de Saint Lawrence (estuario dominado por la descarga fluvial como el analizado en este trabajo), Calero *et al.* (2019) en el estuario del Guadiana (suroeste de la península Ibérica), y Cao *et al.* (2020) señalan que el aumento de la descarga fluvial resulta en menores amplitudes en las constituyentes. Por otro lado, Surya *et al.* (2019) observaron en la bahía de Yakarta que un aumento en la descarga fluvial produce un aumento de la amplitud de las componentes armónicas diurnas ( $K_1$  y  $O_1$ ). Los resultados obtenidos concuerdan parcialmente con los resultados de estos

autores y esto puede ser debido a la fricción de las corrientes de mareas, que tiene efectos más fuertes en la atenuación de las amplitudes de las constituyentes.

## **5. Conclusiones**

Las principales conclusiones del presente Trabajo Fin de Grado son:

La circulación en el estuario del río Itajaí-Açú ha sufrido variaciones en la circulación causadas por los dragados realizados en 2011.

Las corrientes en condiciones de descarga fluvial similar han sido predominantemente de flujo y de mayor intensidad.

La caracterización de las condiciones de marea en el estuario ha puesto de manifiesto que, en los dos períodos analizados, se trata de un estuario con marea mixta, predominantemente semidiurna. Sin embargo, la amplitud de las componentes semidiurnas después de los dragados se ha visto incrementada.

El patrón de circulación de las corrientes en el estuario del río Itajaí-Açú bajo descarga fluvial similar y misma fase lunar ha cambiado después de los dragados de 2011, siendo las corrientes más intensas.

El análisis de las constituyentes armónicas para alta y baja descarga fluvial en 2008 no se ha podido realizar debido a la falta de datos de corrientes para la última mitad de ese año. Si bien, tras los dragados (2011), se ha observado una diferencia considerable en la amplitud de los armónicos de marea en condiciones de alta descarga fluvial respecto a condiciones de baja descarga fluvial.

## **6. Líneas futuras de investigación**

Este trabajo ha permitido conocer los efectos de los dragados en la circulación estuarina del río Itajaí-Açú, considerando datos de velocidad y dirección de corrientes, así como datos de descarga fluvial. Sin embargo, algunos aspectos, como la salinidad, han quedado fuera del estudio. Por ello, se plantean las siguientes líneas futuras de investigación:

1. La identificación de las alteraciones en los valores de salinidad, para estudiar cómo afecta la profundización en el canal del estuario en los flujos de sal y poder identificar los dislocamientos de la cuña salina.

2. El estudio del comportamiento de las corrientes en períodos de alta y baja descarga fluvial para conocer cuál es la predominancia de las corrientes de flujo – reflujo en el estuario. También conocer cómo estas condiciones de descarga fluvial afectan a la intrusión de agua salina.
3. El análisis armónico para identificar posibles alteraciones en la fase de las componentes armónicas de la marea debido a diferentes condiciones de descarga fluvial, comparándolas con las fases en condiciones de descarga fluvial parecida a la media.
4. La utilización de otros modelos de predicción de las mareas para determinar la influencia del desfase de la marea, así como el análisis de la influencia del desfase en la intensidad de las corrientes.
5. La caracterización del balance sedimentario del estuario del río Itajaí-Açú para determinar la influencia de los dragados y si éstos constituyen un impacto positivo o negativo

## 7. Referencias

Estaleiro Itajaí S/A (2018): *Atlas Ambiental da Foz do Rio Itajaí-Açú*. Disponible en: <https://atlasrioitajai.com.br/homehttps://atlasrioitajai.com.br/home>.

Antunes, A., (2010) *IMPACTOS DE ENCHENTE, DRAGAGEM DE APROFUNDAMENTO E DINÂMICA ESTUARINA SOBRE A ICTIOFAUNA NO ESTUÁRIO DO RIO ITAJAÍ-AÇU, SC, BRASIL*. Tesis Doctoral, Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI, Itajaí.

Burchard, H. *et al.*, (2018). The Knudsen theorem and the Total Exchange Flow analysis framework applied to the Baltic Sea, *Progress in Oceanography* 165, 268–286. DOI 10.1016/j.pocean.2018.04.004.

Cai, H. *et al.* (2012). Influence of River Discharge and Dredging on Tidal Wave Propagation: Modaomen Estuary Case, *Journal of Hydraulic Engineering* 138 (10), 885 – 896. DOI 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000594.

Calero, M. C. *et al.* (2019). Effects of tidal and river discharge forcings on tidal propagation along the Guadiana Estuary, *Journal of Sea Research* 149 (2019), 1 – 13. DOI 10.1016/j.seares.2019.01.006.

Cameron, W. M. y Pritchard, D. W., (1963). “*Estuaries*”, en: Mill, M. N. *The Sea. Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas*, New York: Interscience, 306-324.

Cao, Y. *et al.*, (2020). Impact of trends in river discharge and ocean tides on water level dynamics in the Pearl River Delta, *Coastal Engineering*. DOI 10.1016/j.coastaleng.2020.103664.

Castro, S. M. de y Almeida, J. R. de, (2012). Dragagem e conflitos ambientais em portos clássicos e modernos: uma revisão, *Sociedade & Natureza* 24 (3), 519–533. <https://doi.org/10.1590/s1982-45132012000300011>.

Chant, R. J. *et al.*, (2018). Impact of Channel Deepening on Tidal and Gravitational Circulation in a Highly Engineered Estuarine Basin, *Estuaries and Coasts* 41, 1587 – 1600. Doi: 10.1007/s12237-018-0462-z.

Emery, W. and Thomson, R., (2014). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*, 3ª Edición, Kidlington: Elsevier.

EPA. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (2018): *Los estuarios*. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/espanol/los-estuarios#importantes>.

Europea, U., (2012). Desarrollo Portuario Y Obras De Dragado En Estuarios Y Zonas Costeras Natura 2000, Luxemburgo: Oficina de Publicaciones, Unión Europea.

Fadda, E. A., (2013). Instrumentos Legais Aplicados a Dragagem no Brasil, *Revista Brasileira de Geofísica* 31 (2), 17. DOI 10.1017/CBO9781107415324.004.

FRIEDRICHS, C. T., (1995). Stability shear stress and equilibrium cross-sectional geometry of sheltered tidal channels, *Journal of Coastal Research* 11 (4), 1062-1074.

Geyer, W. R. y MacCready, P., (2014). The Estuarine Circulation, *Annual Review of Fluid Mechanics* 46 (1), 175–197. DOI 10.1146/annurev-fluid-010313-141302.

Goes Filho, H. de A., (2004). *Dragagem e gestão dos sedimentos*. Trabajo de Final de Máster, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

González Vázquez, J. A *et al.*, (2018): “Análisis de circulación en estuarios”, en: XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina.

Hansen, D. V y Rattray Jr., M., (1966). New dimensions on estuarine classification, *Limnology Oceanography* 11 (3), 319 – 325.

Jeuken, M. C. J. L. y Wang Z. B., (2010). Impact of dredging and dumping on the stability of ebb-flood channel systems, *Coastal Engineering* 57, 553 – 566. DOI 10.1016/j.coastaleng.2009.12.004.

Knauss, J. A., (1997). *Introduction to Physical Oceanography*, 2ª Edición, Long Grove, Illinois: Waveland Press.

Luz, E. M., (2014). Logística portuária: projeto de modernização da bacia de evolução do porto de Itajaí, *E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial* 7 (2), 83–95.

Matte, P. *et al.*, (2018). Drivers of residual and tidal flow variability in the St. Lawrence fluvial estuary: Influence on tidal wave propagation, *Continental Shelf Research* 174,

158 – 173. DOI 10.1016/j.csr.2018.12.008.

Pawlowicz, R. *et al.* (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE, *Computers&Geosciences* 28 (8), 929 – 937.

Pereira Filho, J., Spillere, L. C. y Schettini, C. A. F., (2003). Dinâmica De Nutrientes Na Região Portuária Do Estuário Do Rio Itajaí-Açú, SC, *Atlântica* 25(1), 11–20. Available at: <http://www.univali.br/pos/doutorado/doutorado-em-ciencia-e-tecnologia-ambiental/producao-cientifica/Documents/producao-cientifica/dinamica-de-nutrientes-na-regiao.pdf>.

Pereira-Filho, J. *et al.*, (2010). Spatial changes in the water quality of itajaí-Açú fluvial-estuarine system, Santa Catarina, Brazil, *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 82 (4), 963–982. DOI 10.1590/s0001-37652010000400019.

R Core Team, (2020). R: A language environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Schettini, C. A. F., (2001). *Dinâmica de sedimentos finos no estuário do rio Itajaí-Açú*, SC, Tesis Doctoral, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Schettini, C. A. F., (2002). Caracterização Física do Estuário do Rio Itajaí-Açú, SC, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 7 (1), 123–142. DOI 10.21168/rbrh.v7n1.p123-142.

Schettini, C. A. F. y Toldo Jr, E. E., (2006). Fine sediment transport modes in the Itajaí-Açú estuary, Southern Brazil Fine Sediment Transport Modes in the Itajaí-Açú Estuary, Southern Brazil, *Journal of Coastal Research* 1, 515–519.

Schettini, C. A. F. y Truccolo, E. C., (2009). “Circulação do baixo estuário do Rio Itajaí”, en: Branco, Joaquim Olinto *et al.* *Estuário do Rio Itajaí-Açú, Santa Catarina: caracterização ambiental e alterações antrópicas*, Itajaí: Editora UNIVALI, 13 – 26.

Schettini, C. A. F. *et al.*, (2013). Variabilidade temporal das características oceanográficas e ecológicas da região de influência fluvial do rio Itajaí-Açú, *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology* 9 (2), 93. doi: 10.14210/bjast.v9n2.p93-102.

Surya, M. Y. *et al.*, (2019). Impacts of Sea Level Rise and River Discharge on the Hydrodynamics Characteristics of Jakarta Bay (Indonesia), *Water* 11. DOI 10.3390/w11071384.

Truccolo, E.C. y Schettini, C.A.F., (2009). “Condições meteo-oceanográficas costeiras na região do estuário o Rio Itajaí-Açú”, en: Branco, J.O., Lunardon-Branco, M.J., Bellotto, V.R. *Estuário do Rio Itajaí-Açú, Santa Catarina: caracterização ambiental e alterações antrópicas*, Itajaí: Univali Editora, 75-90.

Van Maren, D. S. *et al.*, (2014). The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration, *Continental Shelf Research* 95, 1 -14. DOI 10.1016/j.csr.2014.12.010.

Zaleski, A. y Schettini, C.A.F., (2010). Estimação do tempo de trânsito das águas no estuário do rio itajaí-Açú, *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology* 7 (1), 63.